



Titre: Méthode d'évaluation de la diversité et de la qualité des
alternatives de déplacement de transport en commun

Auteur: Alexis Frappier
Author:

Date: 2015

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Frappier, A. (2015). Méthode d'évaluation de la diversité et de la qualité des
alternatives de déplacement de transport en commun [Master's thesis, École
Citation: Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/1983/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/1983/>
PolyPublie URL:

**Directeurs de
recherche:** Catherine Morency, & Martin Trépanier
Advisors:

Programme: Génie civil
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

MÉTHODE D'ÉVALUATION DE LA DIVERSITÉ ET DE LA QUALITÉ DES
ALTERNATIVES DE DÉPLACEMENT DE TRANSPORT EN COMMUN

ALEXIS FRAPPIER

DÉPARTEMENT DES GÉNIES CIVIL, GÉOLOGIQUE ET DES MINES

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION

DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES

(GÉNIE CIVIL)

DÉCEMBRE 2015

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

MÉTHODE D'ÉVALUATION DE LA DIVERSITÉ ET DE LA QUALITÉ DES
ALTERNATIVES DE DÉPLACEMENT DE TRANSPORT EN COMMUN

présenté par : FRAPPIER Alexis

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. FAROOQ Bilal, Ph. D., président

Mme MORENCY Catherine, Ph. D., membre et directrice de recherche

M. TRÉPANIÉ Martin, Ph. D., membre et codirecteur de recherche

M. GRONDINES Jocelyn, M. Sc. A., membre

REMERCIEMENTS

Mes tous premiers remerciements s'adressent à Catherine Morency, à l'initiative du projet de recherche, et qui a réussi à faire germer cette belle idée. Son incroyable énergie a été une réelle source de motivation, surtout dans les moments de doute où je ne savais plus trop quelle direction prendre. Merci de m'avoir fait confiance et de m'avoir donné tant de responsabilités. Je remercie également Martin Trépanier, qui m'a accompagné tout au long du projet et a su me conseiller de son œil d'expert avisé.

Je salue aussi toute l'équipe de transport de Polytechnique, étudiants, associés de recherche ou professeurs. Merci à Hubert Verreault et Jean-Simon Bourdeau pour leur précieuse aide, à Pierre-Léo Bourbonnais pour son soutien technique. Merci aux doctorants ou étudiants de maîtrise, avec qui les échanges plus ou moins formels m'ont permis d'avancer : Kinan Bahbouh, Hamzeh Alizadeh, Annick Lacombe, Marc-André Tessier, Philippe Gaudette, Gabriel Sicotte, Philippe Fortin.

Je tiens à remercier les partenaires de la Chaire Mobilité, pour leur soutien au projet : Ville de Montréal, Société de transport de Montréal, Ministère des transports du Québec, Agence métropolitaine de transport.

Enfin, je remercie chaleureusement tous les proches, amis ou famille, qui m'ont suivi dans cette aventure. De près ou de très loin, suivant plus ou moins mon avancement, ils ont su être présents pour me soutenir, dans les bons comme dans les mauvais moments.

RÉSUMÉ

Le présent mémoire s'inscrit dans le cadre général de l'amélioration de l'évaluation des trajets de transport en commun (TC). Il permet d'aborder la question de l'attractivité de ce mode par un angle original, puisqu'il s'agit de considérer les alternatives disponibles pour assurer le déplacement entre une origine et une destination. Les alternatives de TC sont ici considérées comme des séquences de lignes et de correspondances différentes. L'hypothèse de départ est que le temps n'est pas la seule variable permettant de décrire la qualité d'une alternative et qu'il est pertinent de considérer la diversité des trajets disponibles et non simplement la meilleure alternative. Le but du projet de recherche est donc de fournir une méthodologie pour déterminer la qualité et la diversité d'un ensemble d'alternatives de TC. Ainsi, ses objectifs sont triples :

- Fournir des indicateurs permettant d'évaluer de façon quantitative l'attractivité de chaque alternative;
- Permettre d'attribuer un score à chaque alternative dans le but d'effectuer leur classement;
- Développer deux indicateurs, un de diversité et un de qualité pour l'ensemble des alternatives disponibles.

La première partie du mémoire est une revue de littérature, permettant dans un premier temps de rappeler les étapes de la modélisation de la demande de transport, au travers du choix modal et du choix de route. Ensuite, les différentes manières de mesurer la qualité du transport en commun sont passées en revue. Enfin, la façon avec laquelle la littérature aborde la question de la diversité des chemins est étudiée.

La deuxième partie porte sur l'analyse de sondages réalisés par deux sociétés de transport de la région de Montréal. Les résultats sont étudiés pour faire ressortir les attentes et les irritants des utilisateurs du TC. Les réponses sont ensuite croisées pour déterminer quels sont les autres aspects que le temps permettant de caractériser un trajet de TC. Cette partie vise également à tester les différentes formes de sondage, dans le but de développer par la suite un questionnaire adapté aux besoins du projet.

La troisième partie est la méthodologie développée permettant de répondre aux 3 objectifs précédemment exposés. Dans un premier temps, le contexte de la méthode et sa structure sont précisés afin de situer le cadre méthodologique. Ensuite, les étapes de génération des alternatives, d'évaluation individuelle, de filtrage, de classement et de calcul des deux indicateurs de qualité et de diversité sont détaillées. Enfin, un exemple théorique d'application de la méthode est présenté sur un cas fictif pour expliquer le déroulement de la méthode.

La quatrième partie est une analyse des résultats de la méthode au travers de deux études de cas. La première ne considère que 10 paires origine-destination et a pour but principal d'analyser la sensibilité du classement des alternatives et de l'indicateur de qualité aux différents coefficients de pondération présents dans la méthode. Les résultats montrent ainsi une sensibilité importante du classement et de l'indicateur de qualité aux coefficients appliqués, permettant de faire ressortir certains aspects particuliers de la qualité des alternatives. La deuxième considère un plus grand nombre de paires, dont les origines sont réparties sur toute l'île de Montréal. Elle permet de développer une automatisation de la méthode tout en permettant un diagnostic du service de TC pour rejoindre Polytechnique. Ainsi, les deux indicateurs sont d'une part très différents entre eux et montrent d'autre part des résultats variés suivant la localisation des origines. Ils sont fortement liés aux caractéristiques de l'offre de TC présent sur le territoire.

La cinquième et dernière partie est la conclusion, qui synthétise les principaux points du projet de recherche. Les différentes contributions du projet, aussi bien méthodologiques qu'analytiques, y sont exposées. Les limitations du projet y sont aussi précisées afin de nuancer les résultats de la méthode et de cadrer son utilisation. Enfin, les perspectives de recherche permettent d'ouvrir sur les suites du projet, ses développements futurs et ses améliorations possibles.

ABSTRACT

This thesis lies within the general framework of improving the assessment of transit trips. It allows to address the issue of the attractiveness of this mode towards an original angle, as it is to consider the alternatives available to ensure the trip between an origin and a destination. Transit alternatives are here considered as different sequences of routes and transfers. The assumption is that time is not the only variable to describe the quality of an alternative, and it is relevant to consider the variety of trips available and not just the best alternative. The aim of the research project is to provide a methodology to determine the quality and diversity of transit alternatives. Thus, objectives are threefold:

- Providing indicators to quantitatively assess the attractiveness of each alternative;
- Allowing to assign a score to each in order to perform their classification;
- Developing two indicators, one of diversity and one of quality for all available alternatives.

The first part of the thesis is a literature review, allowing initially to recall the stages of the modeling of transport demand, through the modal choice and the route choice. Then, the different ways of measuring the quality of public transportation are reviewed. Finally, the way in which literature addresses the question of the diversity of paths is investigated.

The second part focuses on the analysis of surveys undertaken by two transit companies of the Montreal region. The results are studied to bring out the expectations and irritating factors of transit users. The answers are then crossed to identify other aspects that the time to characterize a transit trip. This part also aims to test different forms of surveys, in order to subsequently develop a questionnaire tailored to the needs of the project.

The third part is the methodology developed to meet the three objectives set out above. First, the context of the method and its structure are specified to introduce the methodological framework. Then, the various steps of the procedure are described namely: generation of alternatives, individual evaluation, filtering, ranking and estimation of both indicators of quality and diversity. Finally, a theoretical example of application of the method is shown using a hypothetical case.

The fourth part is an analysis of the results of the method through two case studies. The first one considers only 10 origin-destination pairs, and its main purpose is to analyze the sensitivity of the ranking and of the two indicators to different weighting coefficients introduced in the present method. The results thus show a significant sensitivity of the ranking and the quality indicator to the applied coefficients, to bring out specific aspects of the quality of alternatives. The second one considers a larger number of pairs, whose origins are spread over the entire island of Montreal. It enables the development of an automation of the method while enabling a diagnosis of transit service to reach Polytechnique. Thus, the two indicators are on the one hand very different from each other and on the other hand show various results according to the location of origin. They are strongly linked to the characteristics of the transit supply available on the territory.

The fifth and last part is the conclusion, summarizing the main points of the research project. The contributions of the project, both methodological and analytical, are exposed. The limitations of the project are also specified to qualify the results of the method and to frame its use. Finally, the research perspectives allow to open on the continuations of the project, its future developments and improvements.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	III
RÉSUMÉ.....	IV
ABSTRACT	VI
TABLE DES MATIÈRES	VIII
LISTE DES TABLEAUX.....	XII
LISTE DES FIGURES	XV
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XVIII
LISTE DES ANNEXES.....	XIX
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
1.1 Mise en contexte.....	1
1.1.1 Les alternatives de TC.....	2
1.1.2 Hypothèses considérées.....	2
1.1.3 Motivation	3
1.2 Problématique et objectifs	3
1.3 Structure du mémoire	3
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE.....	5
2.1 La modélisation de la demande en transport.....	5
2.2 Le choix modal.....	7
2.3 Le choix de route.....	8
2.3.1 Constitution de l'ensemble des choix de route.....	8
2.3.2 Calcul des routes disponibles	8

2.3.3	Variables d'évaluation des routes	10
2.4	L'évaluation de la qualité du service.....	11
2.5	Les mesures de la qualité du transport en commun	12
2.5.1	La perception du temps	12
2.5.2	L'utilisation du temps.....	13
2.5.3	Les pénalités de correspondance	13
2.5.4	Le temps d'attente et la fréquence de la ligne	15
2.5.5	La fiabilité du service	16
2.5.6	L'information en temps réel.....	17
2.5.7	L'achalandage et le confort à bord.....	17
2.5.8	Les aménagements aux arrêts.....	18
2.5.9	La distorsion géométrique	19
2.5.10	Autres facteurs.....	19
2.6	La diversité des routes	20
2.7	L'échelle réseau.....	21
2.7.1	La théorie des graphes	21
2.7.2	La connectivité entre deux points.....	21
2.7.3	Les calculs de vulnérabilité	22
2.8	Synthèse du chapitre 2.....	23

CHAPITRE 3 LES ATTENTES ET PERCEPTIONS DES USAGERS MONTRÉALAIS 27

3.1	Sondages préliminaires	27
3.1.1	Sondage étudiants.....	27
3.1.2	Sondage Delphi professionnels	28
3.1.3	Sondage par télévotateur	30
3.2	Les recommandations des usagers de l'AMT	32
3.3	Les attentes du panel de la STM	34
3.4	Les perceptions des Longueuillois	41
3.5	Synthèse du chapitre 3.....	55
CHAPITRE 4 MÉTHODOLOGIE		57
4.1	Avant-propos	57
4.1.1	Contexte de la méthode	57
4.1.2	Structure globale de la méthode	59
4.2	Étapes méthodologiques.....	61
4.2.1	Génération de l'ensemble des choix.....	61
4.2.2	Évaluation individuelle	61
4.2.3	Filtrage	71
4.2.4	Classement des alternatives.....	72
4.2.5	Qualité globale	77
4.2.6	Diversité globale	78
4.3	Illustration de la méthode	78

CHAPITRE 5	RÉSULTATS	83
5.1	Analyse de la sensibilité aux coefficients de pondération.....	83
5.1.1	Présentation des données.....	83
5.1.2	Déroulement de la méthode.....	84
5.1.3	Sensibilité du classement	86
5.1.4	Sensibilité de l'indicateur de qualité	91
5.2	Automatisation sur le territoire montréalais.....	94
5.2.1	Présentation des données.....	94
5.2.2	Déroulement de la méthode automatisée	95
5.2.3	Analyse des indicateurs et du filtrage	98
5.2.4	Répartition des indicateurs Q et D	104
5.2.5	Analyse territoriale	107
CHAPITRE 6	CONCLUSION	113
6.1	Synthèse de la recherche	113
6.2	Contributions.....	114
6.3	Limitations	115
6.4	Perspectives	116
BIBLIOGRAPHIE	119
ANNEXES	126

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 Récapitulatif des références sur les différents aspects de la qualité d'un trajet TC (Na= Non applicable)	24
Tableau 3.1 Classement des catégories d'irritant du sondage étudiant (N=14)	28
Tableau 3.2 Classement des catégories d'irritants de la 1 ^{ère} itération du sondage Delphi	29
Tableau 3.3 Classement des catégories d'irritants de la 1 ^{ère} itération du sondage Delphi (suite) ..	30
Tableau 3.4 Comparaison entre la répartition des catégories sociodémographiques de l'échantillon et celle de l'enquête OD 2013	35
Tableau 3.5 Évaluation de l'importance de certaines attentes par les utilisateurs réguliers du métro (N=1288)	36
Tableau 3.6 Évaluation de l'importance de certaines attentes par les utilisateurs occasionnels du métro (N=444)	37
Tableau 3.7 Nombre et pourcentage d'usagers du métro ayant cité l'attente correspondante parmi leurs 5 plus importantes	38
Tableau 3.8 Évaluation de l'importance de certaines attentes par les utilisateurs réguliers du bus (N=1015)	39
Tableau 3.9 Évaluation de l'importance de certaines attentes par les utilisateurs occasionnels du bus (N=312)	40
Tableau 3.10 Nombre et pourcentage d'usagers du bus ayant cité l'attente correspondante parmi leurs 5 plus importantes	41
Tableau 3.11 Évaluation de l'importance de certaines attentes par les utilisateurs du TC (N=836)	42
Tableau 3.12 Évaluation de l'importance de certaines attentes par les automobilistes ouverts au TC (N=1237)	42

Tableau 3.13 Évaluation de l'importance de certaines attentes par les automobilistes fermés au TC (N=703).....	43
Tableau 3.14 Moyennes de l'évaluation des attentes pour les différents types de profil.....	49
Tableau 3.15 Évaluation de l'importance de certaines attentes par les utilisateurs du TC (N=126)	49
Tableau 3.16 Évaluation de l'importance de certaines attentes par les automobilistes ouverts au TC (N=206)	50
Tableau 3.17 Évaluation de l'importance de certaines attentes par les automobilistes fermés au TC (N=70)	51
Tableau 3.18 Intérêts des utilisateurs du TC pour différentes améliorations du service (N=127).52	
Tableau 3.19 Intérêts des automobilistes ouverts au TC pour différentes améliorations du service (N=206)	52
Tableau 3.20 Intérêts des automobilistes fermés au TC pour différentes améliorations du service (N=70)	53
Tableau 4.1 Références pour chaque indicateur (abréviations définies en 4.2.2 Évaluation individuelle; Dae = distance définie plus bas)	74
Tableau 4.2 Coefficients de pondération et fonctions de comparaison des indicateurs (Na = Non applicable)	75
Tableau 4.3 Valeurs des différents indicateurs pour les trois alternatives A, B et C (Na = Non applicable)	79
Tableau 4.4 Valeurs des coefficients de pondération betas considérées.....	81
Tableau 4.5 Scores obtenus par catégorie pour chacune des 3 alternatives	81
Tableau 5.1 Valeurs des coefficients beta et alpha pour les différents cas d'étude	85

Tableau 5.2 Valeurs brutes des différents indicateurs pour les 9 alternatives	87
Tableau 5.3 Comparaison des indicateurs de qualité dans les différents cas pour les 10 paires OD	93
Tableau 5.4 Tarifs d'un trajet suivant la zone et le réseau emprunté.....	96

LISTE DES FIGURES

Figure 3.1 Score des différents facteurs d'influence dans le choix du trajet TC	31
Figure 3.2 Influence d'une 2 ^{ème} alternative sur le choix du TC des répondants	31
Figure 3.3 Seuils de temps pour qu'un trajet TC soit considéré comme une alternative.....	32
Figure 3.4 Répartition des catégories de commentaires émis par les usagers du train de banlieue en 2012 et 2013 © AMT, 2015. Reproduit avec permission.	33
Figure 3.5 Répartition des raisons du choix de mode pour les utilisateurs du TC (N=836)	44
Figure 3.6 Répartition des raisons du choix de mode pour les automobilistes (N=1722)	44
Figure 3.7 Répartition des raisons pour lesquelles le TC n'est pas choisi pour les automobilistes (N=1722)	45
Figure 3.8 Répartition des seuils de retard inacceptable à l'arrêt de TC (N=125).....	46
Figure 3.9 Répartition des seuils de retard inacceptable à l'arrivée de TC (N=125).....	46
Figure 3.10 Répartition des seuils de durée inacceptable en position debout en véhicule (N=105)	47
Figure 3.11 Nombre de personnes découragées de l'utilisation du TC par la présence d'une correspondance (N=127)	48
Figure 3.12 Nombre de répondants acceptant ou non de rallonger leur durée de déplacement.....	54
Figure 3.13 Distribution des durées supplémentaire accordées parmi les répondants (N=195)	54
Figure 3.14 Choix des répondants dans deux cas (N=403).....	55
Figure 4.1 Schéma des facteurs à considérer dans l'évaluation des alternatives pour une paire OD	58
Figure 4.2 Cadre général de la méthodologie	60

Figure 4.3 Comparaison entre le temps d'attente estimé par l'équation et la moitié de l'intervalle	63
Figure 4.4 Coûts de correspondance suivant l'intervalle de ligne aval pour les 3 types de configuration de mode.....	66
Figure 4.5 Illustrations du calcul des indicateurs <i>Cang</i> et <i>Hmax</i>	67
Figure 4.6 Exemple de calcul de <i>in</i> pour trois alternatives A, B et C joignant l'origine O à la destination D	71
Figure 4.7 Schéma de la méthode employée pour arriver au score de chaque alternative.....	73
Figure 4.8 Représentations et informations des 3 alternatives de TC disponibles pour rejoindre l'origine O à la destination D	78
Figure 4.9 Classement des trois alternatives selon le score obtenu	82
Figure 5.1 Localisation des 10 origines et de la destination des paires OD considérées	84
Figure 5.2 Cartographie des 9 alternatives TC pour la paire OD.....	86
Figure 5.3 Répartition des scores par catégorie pour chacune des 9 alternatives de la paire OD..	88
Figure 5.4 Classements des alternatives dans le cas de référence et le cas a).....	89
Figure 5.5 Classements des alternatives dans le cas de référence et le cas b)	89
Figure 5.6 Classements des alternatives dans le cas de référence et le cas c).....	89
Figure 5.7 Quadrants de qualité et de diversité pour les 10 paires OD pour les différents cas.....	91
Figure 5.8 Localisation des origines et destination dans les secteurs municipaux de Montréal ...	94
Figure 5.9 Zones tarifaires de l'île de Montréal	97
Figure 5.10 Pourcentage cumulé des temps d'accès des alternatives (N=507)	99

Figure 5.11 Pourcentage cumulé des temps de sortie des alternatives (N=507).....	100
Figure 5.12 Pourcentage cumulé des temps de correspondance (Tattc + Tmarcc) des alternatives (N=507)	101
Figure 5.13 Temps de trajet moyen des alternatives pour les 123 paires OD.....	102
Figure 5.14 Pourcentage cumulé des temps totaux des alternatives (N=507)	103
Figure 5.15 Répartition du nombre de correspondances des alternatives (N=507)	103
Figure 5.16 Pourcentage cumulé de l'indépendance des alternatives	104
Figure 5.17 Répartition de l'indicateur de diversité D (N=111)	105
Figure 5.18 Répartition de l'indicateur de qualité Q (N=111)	105
Figure 5.19 Quadrant de diversité et qualité pour les 111 paires OD sélectionnées.....	106
Figure 5.20 Répartition sur le territoire de l'île de l'indicateur de qualité des 123 paires.....	107
Figure 5.21 Gros plan sur le secteur Côte-Vertu.....	108
Figure 5.22 Répartition sur le territoire de l'île de l'indicateur de diversité des 123 paires.....	109
Figure 5.23 Gros plan sur le secteur St-Michel.....	110
Figure 5.24 Répartition agrégée par secteur municipal de l'indicateur de qualité.....	111
Figure 5.25 Répartition agrégée par secteur municipal de l'indicateur de diversité.....	112

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

AMT Agence Métropolitaine de Transport

C Coût monétaire du trajet

Cang Coût angulaire

Caph Capacité horaire

Cc Coût de correspondance

CF *Commonality Factor*

Hmax Hauteur maximum

In Niveau d'indépendance

Nc Nombre de correspondances

OD Origine-Destination

PS *Path Size*

RTL Réseau de Transport de Longueuil

STM Société de Transport de Montréal

Stopkm Distance entre les arrêts

Tacc Temps d'accès

Tatt Temps d'attente

Tattc Temps d'attente en correspondance

TC Transport en Commun

Tmarc Temps de marche en correspondance

Tvéh Temps en véhicule

Tsor Temps de sortie

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A – SENSIBILITÉ DU CLASSEMENT AUX COEFFICIENTS DE PONDÉRATION POUR LES 10 PAIRES OD	126
---	------------

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

Se diriger vers une mobilité plus durable apparaît aujourd'hui comme une nécessité, vers laquelle tous les efforts doivent être mis. Parmi les différentes façons d'y parvenir, l'augmentation de la part modale du transport en commun (TC) est incontournable. Cependant, cela n'est souvent pas une tâche aisée, en regard du pouvoir d'attraction qu'exerce l'automobile individuelle. Si cette dernière possède certaines caractéristiques intrinsèques difficilement égalables, comme sa grande flexibilité et le sentiment d'appartenance développé à son égard, le transport en commun a des atouts certains. Ce dernier doit néanmoins toujours améliorer son attractivité pour être plus compétitif.

Se pose alors la question de l'évaluation de l'attractivité du TC par rapport à d'autres modes. Pour cela, il faut revenir au processus de décision de l'utilisateur face à ses choix lorsqu'il s'agit de se déplacer. Évidemment, une multitude de paramètres intervient alors, ces derniers étant plus ou moins rationnels et identifiables. En effet, les différents éléments qui rentrent en compte sont plus complexes que ceux classiquement évalués, comme le temps ou le coût du trajet.

En outre, notre monde actuel connaît une révolution numérique, passant notamment par la démocratisation des téléphones intelligents. Ces derniers sont devenus indispensables pour beaucoup et permettent d'obtenir de précieuses informations lorsqu'il s'agit de se déplacer. Il est maintenant courant de regarder ses différentes options pour effectuer son trajet, grâce à des calculateurs de trajet tels que Transit App ou Google Maps. L'utilisateur peut alors s'informer sur ses différentes alternatives de TC ou autre modes disponibles, les comparer, et choisir laquelle il empruntera.

1.1 Mise en contexte

Le présent mémoire s'intéresse ainsi à développer une méthode permettant d'évaluer l'utilité que peuvent apporter les différentes alternatives de TC disponibles pour réaliser un déplacement. Mais qu'est-ce qu'une alternative de TC ? Qu'est-ce qui en fait sa valeur ? De quelle manière peut-on la caractériser ?

1.1.1 Les alternatives de TC

La définition d'une alternative de TC peut paraître évidente de prime abord, en considérant simplement que c'est un trajet différent. Cependant, chacun a sa propre définition d'une alternative, en fonction de ses habitudes et de ses attentes. En effet, certains ne considèrent par exemple pas comme une alternative un trajet dont le temps de déplacement dépasse de quelques minutes leur meilleur temps de trajet. D'autres au contraire en envisageraient une qui dure deux fois plus de temps que l'alternative la plus rapide.

Cette vision très personnelle d'une alternative de TC nous oblige à décider d'une définition plus théorique. Une alternative de transport en commun sera ainsi considérée comme une séquence de lignes et de correspondances différentes. De plus, il apparaît nécessaire de statuer sur le temps maximum considéré pour qu'une alternative soit prise en compte. En effet, si aucune limite n'est fixée, une infinité d'alternatives existe alors pour chaque trajet. Dans toute la suite du mémoire, une limite de deux fois le temps de l'alternative ayant la durée la plus courte est ainsi fixée.

1.1.2 Hypothèses considérées

L'hypothèse de base considérée concerne l'évaluation des alternatives de TC. Il est ainsi supposé que la modélisation classique, considérant le temps comme unique variable de choix, n'est pas suffisante. En effet, lorsqu'un individu se retrouve face à un choix de plusieurs alternatives, de nombreuses variables rentrent en compte autre que le temps. La qualité de chacune d'entre elles dépend alors de paramètres variés.

De plus, lorsqu'il s'agit d'évaluer un ensemble d'alternatives de transport en commun, nous supposons que sa valeur ne dépend pas seulement de la qualité individuelle de chacune. La quantité d'alternatives joue supposément un rôle important dans cette valeur. Ainsi, plus la diversité des alternatives est grande, plus l'attractivité du transport en commun pour le trajet est importante.

1.1.3 Motivation

L'enjeu est donc de fournir une méthodologie permettant de mesurer cette qualité et cette diversité offertes par les alternatives de TC. Ce travail s'inscrit donc dans une démarche de production d'indicateurs, en continuité des travaux de Sioui (2014) et Nazem (2014).

1.2 Problématique et objectifs

La problématique qui découle de ce constat est la suivante : comment peut-on évaluer de façon pertinente l'ensemble des alternatives de TC disponibles pour un déplacement spécifique ? Le but est donc de développer une méthode qui permet de déterminer la valeur apportée par la qualité et la diversité d'un éventail d'alternatives.

Cette question appelle alors plusieurs sous-objectifs. D'abord, il est nécessaire de fournir une série d'indicateurs quantitatifs pour chaque alternative disponible. Ces derniers doivent prendre en compte des aspects variés et plus qualitatifs, en ne considérant pas seulement le temps. Ils doivent ainsi mettre en exergue de façon plus précise l'attractivité de ces alternatives. Ensuite, un classement de ces alternatives doit être réalisé, en vue de calculer un indicateur de qualité global pour l'ensemble. Enfin, un indicateur reflétant la diversité de ces alternatives doit être formulé. Cela permet au final de pouvoir situer chaque paire Origine-Destination (OD) sur un cadran de qualité et de diversité, suivant les alternatives de TC disponibles pour réaliser le trajet désiré.

1.3 Structure du mémoire

Le présent mémoire est composé de cinq chapitres.

Ce premier chapitre est l'introduction, permettant de présenter le cadre du mémoire. Les notions importantes sont définies et les hypothèses sont posées. La problématique et les objectifs du mémoire sont également énoncés. Ensuite, le second chapitre est une revue de littérature, permettant de rappeler l'historique de la modélisation classique en transport et présentant l'avancée des études actuelles sur la diversité et la qualité des alternatives de TC. Le troisième chapitre est une analyse de diverses enquêtes réalisées auprès des usagers du transport en commun dans la région de Montréal, montrant les attentes et perceptions des voyageurs. Le

quatrième chapitre contient la méthodologie utilisée dans l'évaluation de la qualité et la diversité des alternatives de TC. Il présente les différentes étapes de réalisation de cette méthodologie, ainsi qu'un exemple d'application pratique de celle-ci. Le cinquième chapitre expose les résultats fournis par la méthode, analyse sa sensibilité et expérimente son automatisation à plus grande échelle. Enfin le sixième chapitre est la conclusion du mémoire. Il montre les contributions offertes par la recherche, mais aussi ses limitations et ses perspectives.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

Le présent chapitre offre une revue de la littérature en lien avec la problématique présentée précédemment. Elle permet ainsi d'avoir un aperçu sur les principaux travaux en lien avec le sujet du présent mémoire et de l'insérer dans les problématiques actuelles. Les thèmes abordés débutent dans une perspective générale avec la modélisation classique de la demande en transport, pour aller jusqu'à des thématiques plus spécifiques avec les mesures de la qualité et de la diversité des trajets TC.

2.1 La modélisation de la demande en transport

Prévoir la demande en transport des individus est loin d'être une tâche aisée. Tout d'abord, il est question de modéliser des comportements humains, ce qui est par essence extrêmement difficile. Il n'est pas non plus possible de véritablement réaliser des expériences en milieu contrôlé, comme on le ferait dans d'autres domaines scientifiques. De plus, le déplacement d'un individu n'est généralement pas une fin en soi, mais une conséquence d'un besoin de se rendre vers une certaine activité. La littérature en la matière est importante et il existe de nombreux ouvrages de référence. Parmi ceux-ci, le *Handbook of Transport Modelling – Second Edition* comporte un chapitre complet sur l'histoire de la modélisation de la demande de transport (Bates, 2008). L'auteur aborde le problème de la dichotomie offre et demande en transport par une analogie économique. En effet, ces deux notions sont fonctions du coût généralisé, qui inclut à la fois les coûts monnayables et temporels. Ensuite, tout comme dans un autre ouvrage de référence *Modelling Transport – Fourth Edition* (Ortúzar & Willumsen, 2011), il rappelle que la demande est intimement liée au territoire sur lequel les activités sont situées. Tous ces auteurs insistent également sur le fait que la demande dépend de nombreux autres paramètres, comme le moment où la modélisation est effectuée (heure de la journée, journée de la semaine, mois etc.) ou encore les caractéristiques de la personne (âge, revenu, possession automobile etc.).

L'accent est aussi mis sur le choix de modèle à considérer suivant le niveau sur lequel on souhaite se concentrer (Koppelman & Bhat, 2006; Ortúzar & Willumsen, 2011). En effet, si l'on souhaite considérer un ensemble de personnes avec certaines caractéristiques similaires, le

modèle peut être agrégé. Ce type de modèle a l'avantage d'être plus simple et de nécessiter moins de données et de temps de calcul. Cependant, son niveau de précision est bien moins grand qu'un modèle désagrégé. Dans un tel modèle, l'intérêt est porté sur le comportement individuel, en s'attachant aux réelles conditions avec lesquelles la personne se déplace. Bien que plus complexe et coûteuse, elle a notamment l'avantage d'être plus sensible aux changements dus au service ou aux caractéristiques de la personne. De plus, elle est facilement transférable à d'autres types de contextes parce qu'elle s'attarde aux caractéristiques des individus et dépendent moins des variations territoriales et du réseau (Koppelman & Bhat, 2006).

Il est impossible d'aborder la question de la modélisation de la demande en transport sans citer le modèle classique à quatre étapes. Ce modèle agrégé, développé il y a des décennies, continue encore aujourd'hui d'être perfectionné et d'être à la base de nombreuses modélisations. Il est expliqué en détail dans de nombreux ouvrages (Bates, 2008; Cambridge Systematics Inc. et al., 2012). Sa première étape, la génération des déplacements, nécessite d'abord un découpage du territoire à l'étude en plusieurs zones. Pour chacune d'entre elles, les données agrégées de population, de caractéristiques sociodémographiques ou encore d'emplois sont nécessaires. Elles permettent d'estimer pour chacune des zones le nombre de déplacements générés (sortant de la zone) et attirés (arrivant vers la zone). La deuxième étape concerne la distribution des déplacements de l'étape précédente. Elle permet de lier les déplacements générés et attirés par chaque zone, en considérant le coût intra et interzonal. La troisième étape est le choix modal. Elle attribue un mode spécifique pour les déplacements de l'étape précédente. Pour finir, la quatrième étape est l'attribution de la route. En effet, une fois le mode sélectionné dans l'étape précédente, il reste alors à choisir le chemin emprunté. Ce modèle est souvent critiqué comme étant dépassé et ne faisant pas réellement état du processus de décision d'un individu. Ainsi, il a souvent été modifié au fil des années, s'adaptant au contexte de l'époque. Parmi les récentes améliorations, le NHCRP Report 716 (Cambridge Systematics Inc. et al., 2012) en recense quelques-unes. Ces dernières concernent la structure même du modèle, comme la prise en compte du moment de la journée de façon plus précise, l'inclusion des chaînes d'activités ou l'amélioration de certaines étapes. Elles touchent aussi l'insertion des modes non motorisés ou les nouvelles données aujourd'hui disponibles grâce aux nouvelles technologies.

2.2 Le choix modal

La troisième étape du modèle classique présenté plus haut est le choix modal. Il permet ainsi de répartir les déplacements de l'étape de distribution entre les différents modes de transport. Le NHCRP Report 716 (Cambridge Systematics Inc. et al., 2012) nous informe qu'il est d'abord nécessaire de répertorier les modes disponibles pour le trajet. Ces derniers sont classiquement regroupés entre l'automobile, le transport en commun et les modes non motorisés (marche et vélo), même si ces derniers ne sont pas inclus dans tous les modèles. Les facteurs qui déterminent le choix du mode sont généralement classés en trois groupes (Ortúzar & Willumsen, 2011) : les caractéristiques de l'individu (possession automobile, structure familiale, revenu etc.), les caractéristiques du trajet (motif du déplacement, moment de la journée etc.) et les caractéristiques du service de transport. Ces derniers peuvent être quantitatifs (temps, coût etc.) ou qualitatifs (confort, sécurité etc.). Ces mêmes auteurs rappellent toutefois qu'il faut souvent considérer la chaîne de déplacement au complet pour comprendre le choix de mode. En effet, l'individu va choisir son mode pour son déplacement en fonction des autres déplacements qu'il devra effectuer dans la journée (Sicotte, 2014). Ils exposent ensuite le principe de coût généralisé, qui prend en compte l'ensemble des dépenses qu'un trajet engendre. Le choix de mode de l'individu s'effectue alors en choisissant l'option qui va minimiser ce coût généralisé. Cependant ils expliquent également que ce coût généralisé ne permet pas de prendre en compte les spécificités individuelles de chacun. Il est ainsi évident que les coûts engendrés pour un trajet varient d'un individu à l'autre et sont perçus de façon différente par chacun. Comme l'expose aussi le NHCRP Report 716 (Cambridge Systematics Inc. et al., 2012), le principe de choix discret est alors considéré. Celui-ci suppose que le choix dépend à la fois des caractéristique du trajet et de la personne qui l'emprunte. Le concept d'utilité est alors défini pour représenter l'attractivité d'un trajet pour un certain individu. Ce dernier va alors chercher à maximiser son utilité. La prédiction du mode se fait ensuite à l'aide d'une fonction de type logit, dont l'extrant est compris entre 0 et 1, et qui représente la probabilité qu'un individu choisisse un certain mode. Celle-ci dépend généralement des différences d'utilités exercées par les différentes alternatives sur un individu. Cependant, comme le nombre de modes disponibles est bien souvent supérieur à deux, le modèle peut être transformé en logit multinomial, qui prend en compte alors toutes les options de modes. De plus, il existe également des modèles logit de types imbriqués, qui permettent de prendre en

compte le fait que le choix se fasse par étapes. Par exemple, l'utilisateur choisit d'abord entre l'automobile et le transport en commun. S'il choisit le transport en commun, il peut ensuite choisir entre le bus, le métro, le train, etc. (Cambridge Systematics Inc. et al., 2012). Cependant, la littérature ne fait pas de référence explicite au fait qu'un mode qui dispose de beaucoup d'alternatives pour réaliser un déplacement augmente son utilité par rapport aux autres modes disponibles.

2.3 Le choix de route

Cette section vise à présenter la quatrième étape du modèle classique, qui consiste en l'affectation des déplacements via un mode spécifique sur une route. Pour cela, il est nécessaire de constituer un ensemble de choix de route, en calculant celles disponibles, puis de les évaluer individuellement.

2.3.1 Constitution de l'ensemble des choix de route

La première étape consiste donc à former un ensemble de trajets disponibles pour réaliser un trajet via un mode. Différentes méthodes permettent d'aborder ce problème. Ortuzar et Willumsen (2011) recensent différentes manières d'y parvenir. L'une d'entre elles est de ne sélectionner que les trajets effectivement empruntés par les utilisateurs. Cela nécessite alors d'avoir les données de trajets empruntés, qu'ils soient observés (données GPS par exemple) ou déclarés (enquête auprès des personnes). L'avantage de cette méthode est qu'elle ne prend en compte que les trajets réellement réalisés. Une autre est de définir certaines contraintes permettant de ne prendre que les alternatives répondant à certains critères (un temps d'accès maximum par exemple). Les contraintes sont alors fixées en utilisant des données de validation. Il est cependant bien souvent nécessaire d'utiliser une méthode de calcul automatique des routes disponibles pour assurer le déplacement.

2.3.2 Calcul des routes disponibles

Les calculateurs de chemin en transport en commun suivent différents types de construction. Leurs méthodes peuvent être classées en deux groupes : chemin le plus court et multi chemins (Cambridge Systematics Inc. et al., 2012). Les méthodes de chemin le plus court trouvent le

chemin qui minimise l'impédance (coût généralisé) entre l'origine et la destination. Cette impédance est généralement une combinaison linéaire des différents temps et du coût de trajet, pondérée adéquatement. Les méthodes dites multi chemins calculent simultanément plusieurs chemins, qui ne minimisent pas tous l'impédance mais répondent à certaines contraintes définies préalablement. Prato (2009) mène dans une étude une revue complète des techniques de génération des chemins. La méthode la plus simple consiste à trouver les K chemins les plus courts pour assurer le trajet. L'approche par étiquette attribue quant à elle un calcul d'impédance différent à chaque itération de chemin le plus court. Ainsi, différents attributs peuvent être minimisés ou maximisés lors du calcul du chemin le plus court, répondant aux différents types de contraintes que peut imposer un individu. Une autre méthode enlève une partie ou l'ensemble des liens du chemin le plus court trouvé dans l'itération précédente. Cela permet ainsi d'obtenir des chemins différents à chaque itération. Une variante de cette méthode est de ne pas ôter de liens, mais de leur attribuer une pénalité plus importante.

Un problème majeur qui survient lorsque les différents chemins sont générés est leur inter corrélation. En effet, les différentes alternatives empruntent bien souvent les mêmes parties de lignes. Pour tenir compte de cet aspect, Cascetta, Nuzzolo, Russo, et Vitetta (1996) ont introduit un facteur supplémentaire dans leur modèle de choix logit. Appelé « Commonality Factor » (CF), il mesure la similarité de chaque chemin par rapport à tous les autres chemins trouvés. Plusieurs formulations existent pour le CF, incluant à chaque fois une fonction logarithmique des différentes longueurs de lignes empruntées. Il est ensuite sommé à la fonction d'utilité de l'alternative dans la formulation du modèle. Plus une alternative présente de lignes en commun avec les autres, plus le CF est grand. Ben-Akiva et Bierlaire (1999) ont quant à eux inséré un autre type de facteur dans leur modèle logit. Appelé « Path Size » (PS), il mesure en quelque sorte la complétude de l'alternative, c'est à dire à quel point les lignes empruntées sont utilisées par d'autres alternatives. Plus la similarité avec d'autres chemins est grande, plus le PS est petit. Ce facteur de correction est formulé de différentes manières, mais il est toujours calculé en prenant l'inverse du nombre d'alternatives qui empruntent le même segment de ligne que l'alternative en question.

Le nombre de chemins ainsi trouvés peut-être extrêmement grand, suivant les contraintes et les paramètres fixés. Bovy (2009) rappelle qu'il est parfois nécessaire d'enlever de l'ensemble des

choix possibles certains trajets qui ne peuvent être considérés comme de vraies alternatives. La première vérification à opérer concerne le chevauchement entre les différents chemins. S'il est trop important entre certains chemins, il faut alors effectuer une sélection. De plus, certaines séquences de lignes calculées peuvent être en réalité non praticables. Ces aberrations doivent alors être éliminées. Hunt (1990) propose par exemple dans un modèle de ne seulement considérer les alternatives pour lesquelles la distance d'accès est de moins de 1500 mètres et le nombre de correspondances inférieur ou égal à deux.

2.3.3 Variables d'évaluation des routes

Pour évaluer chacune de ces routes, de nombreuses variables peuvent être considérées. Parmi les plus classiques en TC, on retrouve le coût du trajet et les différents temps (accès à l'origine, attente, en véhicule, en correspondance, accès à la destination) (Cambridge Systematics Inc. et al., 2012). Cependant, de nombreuses études considèrent d'autres variables pour évaluer les différentes alternatives. Ainsi, Anderson (2013) propose dans sa thèse une revue étoffée d'études sur le sujet. Cette dernière rassemble les estimations de coût de certains paramètres, trouvés par différents auteurs dans différents contextes. Ces coûts sont ensuite tous convertis en temps puis calibrés par rapport au temps en véhicule pour un bus. Nielsen et Frederiksen (2006) différencient le type de mode emprunté (bus et différents types de train) dans leur étude. Eluru, Khakour, et El-Geneidy (2012) séparent aussi le mode de transport emprunté dans leurs variables d'évaluation des alternatives. Arentze et Molin (2013) insèrent quant à eux des variables de fiabilité (délai possible), de confort à l'arrêt (équipements disponibles) et en véhicule (disponibilité de siège). Nielsen et Johansen (2012) décomposent les correspondances via un nombre de transferts, sous la forme d'une pénalité de correspondance, à laquelle ils ajoutent également une variable de temps d'attente et de marche en correspondance. Le type de correspondance est différencié dans l'étude de Nazem, Trépanier et Morency (2011), portant sur l'analyse du choix de route en TC. Ainsi, on y retrouve les trois variables du nombre de correspondances impliquant deux lignes de bus, une ligne de bus et un métro et deux métros. Bovy et Hoogendoorn-Lanser (2005) segmentent eux aussi les correspondances en deux types dans leur étude, en s'intéressant cette fois-ci au rythme de passage de la ligne impliquée. Les variables correspondantes sont le nombre de correspondances à haute fréquence et le nombre à faible fréquence. La fréquence de la ligne empruntée est une variable additionnelle au temps d'attente dans l'étude menée par Abrantes et

Wardman (2011). Enfin, Raveau, Guo, Muñoz, et Wilson (2014) ont mené une étude comparative dans les réseaux de Londres et Santiago. Ces derniers explorent une large quantité de variables, dans divers aspects très précis. En effet, ils différentient notamment les transferts où il est nécessaire de monter, de rester au même niveau et de descendre. L'achalandage à bord est également considéré, à travers une variable de probabilité de s'asseoir, d'occupation moyenne du véhicule et d'impossibilité de monter à bord. Enfin, le caractère direct du trajet est aussi pris en compte, grâce entre autres à des variables de coût angulaire et de nombre de stations empruntées.

2.4 L'évaluation de la qualité du service

Nombreuses sont les études cherchant à déterminer la qualité du service de TC. Barbey & Kaufmann (2007) ont publié un rapport afin d'évaluer la desserte de train et bus dans la région de Nyon en Suisse. Ces derniers se sont basés sur six variables pour évaluer la qualité du transport en commun : temps de parcours vers 10 destinations, correspondances vers 10 destinations, fréquence horaire de 7h à 19h, amplitude horaire, accessibilité et connectivité. Ce système d'indicateurs leur a permis de dresser un bilan de la qualité du service sur le territoire à l'étude. Litman (2013) fournit quant à lui une excellente revue des différents aspects en regard desquels le service de transport en commun peut être évalué : disponibilité et couverture du territoire, fréquence, vitesse commerciale, fiabilité, correspondance, structure tarifaire, confort et sécurité, accessibilité, conception universelle, abordabilité, information, esthétisme et enfin aménagements. Le « Transit Capacity and Quality of Service Manual » (TCQSM) fournit un guide complet pour déterminer la qualité du service de transport en commun (Kittelsohn & Associates Inc., Parsons Brinckerhoff, KFH Group Inc., Texas A&M Transportation Institute & Arup, 2013). Pour différents aspects du service, le guide s'attache à établir des niveaux de qualité. Des tableaux pour chacun de ces aspects y présentent la qualité perçue par le passager ainsi que le point de vue de l'opérateur selon le niveau de qualité correspondant. Ces tableaux concernent la fréquence, les heures de service, la couverture du territoire, l'achalandage et la fiabilité.

D'autres études se sont également intéressées aux perceptions des passagers vis-à-vis de la qualité du service, en enquêtant directement auprès d'eux. C'est le cas d'Eboli et Mazzulla (2011), qui ont effectué un sondage auprès d'utilisateurs réguliers d'une ligne de bus dans le sud

de l'Italie. Ils y demandaient l'importance accordée à certains critères de qualité pour les passagers. Les résultats ont ensuite été mis en relation avec les données de performance fournies par l'opérateur. Ces critères concernaient les caractéristiques de la ligne et de son service, la fiabilité, le confort, la propreté, le tarif, l'information, la sécurité, le personnel, les services au client et la protection de l'environnement. Shaaban et Hassan (2014) ont également mené une enquête auprès des résidents de Doha au Qatar qui possédaient une voiture. Les questions concernaient l'importance de différents éléments d'une station de métro. Les aspects traités sont la localisation, l'inter modalité, les stationnements, les équipements, la sécurité, la tarification et le confort.

2.5 Les mesures de la qualité du transport en commun

Les différents aspects de la qualité du transport en commun ont été énoncés dans les sections 2.3.3 Variables d'évaluation des routes et 2.4 L'évaluation de la qualité du service. La présente section présente les différentes mesures présentes dans la littérature permettant d'évaluer ces aspects.

2.5.1 La perception du temps

De nombreuses études traitent de la perception du temps lors d'un trajet en transport en commun. Ce principe s'appuie sur le fait que les passagers perçoivent différemment la durée de leur trajet, suivant leur environnement et l'activité pratiquée. Ainsi, une situation jugée pénible a comme effet de donner le sentiment qu'elle dure plus longtemps que ce qu'elle dure réellement.

Bien souvent, les études dans le domaine découpent le trajet en différentes phases (accès à l'origine, attente, en véhicule, correspondance et accès à la destination). Elles expriment ensuite leurs résultats comme des temps perçus pendant ces différentes phases, calibrés en fonction du temps en véhicule. Le TCQSM rassemble par exemple les données d'un grand nombre d'études menées aux États-Unis (Kittelsohn & Associates Inc. & al., 2013). Calibrés en fonction de la perception du temps en véhicule fixé à 1, le temps de marche y est perçu à 2,2 en moyenne (variant de 0,8 à 4,4), le temps d'attente initial est perçu à 2,1 en moyenne (variant de 0,8 à 5,1) et le temps de correspondance est perçu à 2,5 en moyenne (variant de 1,1 à 4,4). Une autre étude française sur le sujet prend en compte que le temps d'attente est perçu comme 1,5 fois plus long

que la réalité, le temps de marche 2 fois plus et le temps de correspondance 2 fois plus également (Roquigny, 2013). En outre, Anderson (2013) répertorie dans sa thèse sept études concernant les estimations de temps perçu de voyageurs en TC, dans des contextes variés. Elle modifie leurs résultats afin de tous les présenter sous la même forme, c'est-à-dire calibrés par rapport au temps en véhicule en bus.

2.5.2 L'utilisation du temps

Des études montrent que le temps de trajet n'est pas seulement un temps perdu que les voyageurs cherchent à minimiser. Stratton, Wies, Vovsha, Freedman et Outwater (2013) proposent ainsi de considérer le temps en transport en commun comme vecteur de productivité, pendant lequel les passagers peuvent pratiquer diverses activités comme socialiser, travailler ou même dormir. Cette thèse est également défendue par Lyons & Urry (2005) dans leur étude, où ils expliquent de quelle manière le temps de trajet peut-être perçu comme utile. Lyons, Jain et Holley (2007) ont par ailleurs effectué un sondage auprès des passagers du train en Grande-Bretagne. Toutes cohortes d'âge confondues, plus des deux tiers des répondants ont affirmé que le temps de trajet était pour eux d'une certaine utilité, voire très profitable. Cela confirme le fait qu'il faille explorer d'autres aspects que la minimisation du temps pour évaluer la qualité d'un trajet de façon plus pertinente.

2.5.3 Les pénalités de correspondance

Les correspondances ont un effet majeur sur la perception de pénibilité d'un trajet en transport en commun. En effet, les individus ont tendance à surestimer leur temps de déplacement lorsque celui-ci inclut une ou plusieurs correspondances. Une étude a été menée à ce sujet par Kaufmann et Messer (2012) sur le réseau de tramway de Genève en Suisse. Ces derniers ont effectué un sondage auprès de 1252 voyageurs pour connaître leur estimation de temps de trajet pour motif travail, ainsi que le nombre de correspondances réalisé sur leur trajet. Les résultats montrent que sans correspondance, 29% des personnes interrogées surestiment leur temps de trajet. Ce chiffre monte à 42% avec une correspondance, 45% avec deux correspondances et 63% lorsqu'il y en a plus de deux. Il y a donc dans ce cas une surestimation croissante du temps de trajet avec l'augmentation du nombre de correspondances.

Le TCQSM explique que les correspondances sont mal perçues par les voyageurs en raison de la possibilité de manquer le transfert vers la ligne suivante (Kittelson & Associates Inc & al., 2013). Il y a ainsi un risque que le trajet dure plus longtemps que prévu et que le voyageur se retrouve à attendre un certain temps au point de correspondance. Cela peut également rendre le déplacement plus compliqué pour certaines personnes qui ne voyagent pas souvent. Le manuel rapporte que chaque transfert engendre une pénalité se situant entre 12 et 17 minutes. Litman (2008) chiffre ce temps additionnel à un équivalent de 5 à 15 minutes par rapport au temps en véhicule. Il explique également que cette pénalité traduit l'effort à la fois physique et psychologique qu'un individu subit lors d'une correspondance. Anderson (2013) fait la revue des différentes valeurs de pénalités de correspondance dans sa thèse. Les valeurs trouvées (en minutes) sont de 3,8 (Raveau, Muñoz, & Grange, 2011), 4 (Nielsen & Johansen, 2012), 5,9 (van der Waard, 1988), 15,1 (Nielsen & Frederiksen, 2006) et 18,9 (Vrtic & Axhausen, 2002). Ces valeurs dépendent bien évidemment du contexte et des spécificités de l'étude en question.

Certains auteurs établissent plus précisément la pénalité en classifiant les correspondances suivant différents aspects. Bovy et Hoogendoorn-Lanser (2005) estiment qu'une correspondance pour laquelle la fréquence de la ligne vers laquelle la correspondance est faite est élevée minimise les conséquences d'un transfert échoué. Ils ont différencié ainsi les correspondances à fréquence élevée (intervalle de moins de 7 minutes) à celles à fréquence faible (intervalle supérieur à 7 min). La pénalité pour le premier type est alors de 5,1 minutes, tandis qu'elle est de 11,4 pour le second. Hadas et Ranjiktar (2012) ont quant à eux étudié les correspondances bus à bus en Nouvelle-Zélande. Ils les ont catégorisés en trois types : correspondance où aucune marche n'est nécessaire pour se rendre à l'arrêt suivant, correspondance où l'arrêt est situé sur le même trottoir et correspondance où l'arrêt se trouve de l'autre côté de la rue. Enfin, Iseki, Taylor et Miller (2006) se sont attachés à définir les différentes caractéristiques intervenant dans les pénalités de correspondances. Celles-ci sont classées en trois catégories. La première est l'éventuel coût monétaire d'une correspondance. La deuxième concerne le service, incluant les notions de fréquence du service, de fiabilité et de disponibilité d'information en temps réel. La troisième traite des équipements de la station de correspondance, à savoir l'accessibilité, l'information, les aménagements et la sécurité.

2.5.4 Le temps d'attente et la fréquence de la ligne

La façon la plus simple d'estimer le temps d'attente d'un passager pour sa première ligne de transport en commun est de considérer la moitié de l'intervalle de la ligne en question. Cela suppose alors que tous les passagers arrivent selon une distribution uniforme dans le temps. Pourtant, les études montrent que ce n'est pas toujours le cas. En effet, au-delà d'un certain intervalle, les usagers commencent à planifier leur arrivée en fonction de l'horaire. Luethi, Weidman et Nash (2007) proposent une revue d'anciennes études dans le domaine dans divers contextes européens. Les intervalles à partir desquels les arrivées ne sont plus aléatoires y sont entre 5 et 12 minutes. Les auteurs ont également mené leur propre étude en recueillant des données en heure de pointe dans le transport en commun zurichois (Suisse). Les résultats montrent que lorsque l'intervalle atteint 400 secondes, la densité temporelle d'arrivée de passagers n'est pas uniforme entre deux intervalles. Les passagers sont en effet beaucoup plus nombreux à arriver quelques minutes avant le prochain départ. Cet effet s'accroît encore plus lorsque l'on atteint les 600 secondes. La médiane du moment d'arrivée des passagers avant le départ de la ligne est alors tracée pour différentes observations d'intervalles. L'approximation qui se rapproche le plus de la courbe obtenue est alors logarithmique. Nielsen (2000) revient également sur ces aspects de temps d'attente dans son étude. Il y intègre également la notion de temps d'attente cachée, qui correspond à l'attente impliquée par une arrivée trop tôt à la destination souhaitée. Cela exprime plus généralement le fait que les horaires fixés des lignes ne correspondent pas forcément aux emplois du temps des voyageurs. Enfin, le temps d'attente en correspondance est aussi abordé par Vuchic (2005) dans un de ses ouvrages. Il y explique que le fait de transférer vers une ligne qui possède un intervalle assez grand (de plus de 10 minutes par exemple) peut causer une attente en station de correspondance très importante, allant jusqu'à la durée totale de l'intervalle. Le risque de manquer une correspondance s'avère néanmoins avoir moins de conséquences pour un intervalle plus petit.

La fréquence (ou intervalle) de la ligne est parfois intégrée directement dans certains modèles comme variable explicative. Anderson (2013) expose dans sa thèse que chaque minute d'intervalle supplémentaire ajoute entre 0,3 et 0,5 minutes équivalentes de temps en véhicule suivant les études. Carrel, Halvorsen, et Walker (2013) ont effectué une enquête web auprès d'utilisateurs de la compagnie assurant le transport en commun à San Francisco. Ils ont alors

demandé l'intervalle maximum pour que le service soit considéré comme fréquent. Les résultats montrent qu'en moyenne, les voyageurs répondent 10 minutes d'intervalle, soit une fréquence de 6 passages par heure.

2.5.5 La fiabilité du service

La question de la fiabilité du service de transport en commun n'est pas simple à aborder. En effet, il n'est déjà pas de nature évidente de trouver une définition universelle de cette notion. Carrel, Halvorsen et Walker (2013) s'interrogent justement sur ce qu'est la fiabilité. De façon traditionnelle, ils expliquent qu'elle est en lien avec la variabilité du temps de transport. Pourtant, d'autres paramètres rentrent en compte, comme l'adhérence à l'horaire ou la probabilité de panne. Une autre façon de la considérer est d'y intégrer les notions de répétabilité et de prédictibilité des retards et des pannes sur le service. Les auteurs insistent aussi sur le fait que la fiabilité dépend largement de ce que le passager entend comme situation normale ou acceptable.

Le TCQSM fournit un guide permettant de catégoriser le niveau de fiabilité suivant les données de retards (Kittelton & Associates Inc. & al., 2013). Ainsi, si l'intervalle de service est de plus de 10 minutes, l'indicateur considéré est le pourcentage de respect de l'heure d'arrivée. Seuls les retards qui dépassent 5 minutes sont alors pris en compte. Suivant cette donnée, la fiabilité est placée dans une certaine classe de fiabilité. Si le pourcentage est en dessous de 70%, le service est considéré comme très peu fiable. Si l'intervalle de service est en dessous de 10 minutes, l'indicateur considéré est le coefficient de variation de l'intervalle (rapport entre la déviation standard de l'intervalle et l'intervalle moyen). Si le coefficient dépasse 0,75, le service est considéré comme très peu fiable.

D'autres études s'intéressent plus à la fiabilité du point de vue de la perception du passager. Roquigny (2013) présente dans son rapport les perceptions mesurées du retard dans différents contextes. La valeur moyenne de l'équivalent-temps d'une minute de retard est alors entre 2,5 et 7,4 minutes. Il présente également un tableau permettant de calculer le nombre de minutes équivalentes pour tout retard supérieur à 5 minutes, suivant les probabilités de retards déjà enregistrés sur la ligne. Une autre manière de prendre en compte la perception du voyageur est d'étudier son « buffer time ». Ce dernier est le temps supplémentaire qu'un individu planifie afin de réduire les conséquences d'un retard probable. Deux méthodes sont étudiées par Wood,

Halvorsen, Koutsopoulos, et Wilson (2015), nécessitant des données de cartes à puce et de géolocalisation des véhicules en temps réel. L'avantage de cette approche est qu'elle permet de considérer le « buffer time » des passagers par ligne ou par paire OD.

2.5.6 L'information en temps réel

De plus en plus de réseaux offrent de l'information en temps réel à leurs voyageurs, permettant ainsi de connaître la position de leur véhicule et leur véritable heure d'arrivée aux arrêts. Cela permet de réduire le temps d'attente perçu et de rassurer les voyageurs en cas d'incidents (Turnbull & Pratt, 2003). Gooze, Watkins, et Borning (2013) expliquent de façon détaillée comment l'information en temps réel peut réduire le sentiment d'inconfort de l'utilisateur en cas de retard.

Certaines études ont cherché à démontrer concrètement ce phénomène. C'est le cas de Watkins, Ferris, Borning, Rutherford et Layton (2011) qui ont effectué un sondage auprès de voyageurs à différents arrêts de bus. Chez les personnes qui n'utilisaient pas de système d'information en temps réel sur leur cellulaire, le temps d'attente moyen déclaré est de 9,86 minutes, contre 7,54 minutes pour ceux qui l'utilisaient. Dziekan et Vermeulen (2006) ont également distribué un questionnaire à des arrêts de tramway à La Hague (Pays-Bas) avant et après l'installation d'un tel système aux arrêts. Les résultats montrent que le temps d'attente moyen perçu était de 6,3 minutes avant la mise en place, contre 5 minutes après.

2.5.7 L'achalandage et le confort à bord

La perception du confort en véhicule a souvent été abordée sous l'angle de l'achalandage à bord. Litman (2008) rapporte les valeurs monétaires associées à différents niveaux de promiscuité dans une étude australienne. Ainsi, l'échelle commence au stade où aucun siège n'est disponible, associée au coût de 2 cents par minute. Le niveau le plus haut de pénibilité est celui où le passager est debout depuis plus de 20 minutes dans un véhicule au maximum de sa capacité. Le coût attribué est alors de 17 cents par minute.

De nombreuses études fournissent également un coefficient multiplicateur de temps en fonction du niveau d'achalandage. Le NCHRP Report 616 fournit un tableau de pénalités d'achalandage

pour le train suivant le facteur de charge (nombre de passagers par siège) (Dowling et al. 2008). La pénalité diffère si le passager est en position assise ou debout. Dans le premier cas, la pénalité varie de 0,004 CAD par minutes si le facteur de charge est de 0,9 jusqu'à 0,022 CAD par minutes s'il est de plus de 1,4. Dans le second cas, la pénalité commence lorsque le facteur est à 1 avec 0,061 CAD par minutes jusqu'à 0,089 CAD par minutes si le facteur atteint les 1,6. Whelan et Crockett (2009) ont quant à eux estimé un coefficient multiplicateur de temps pour le train en fonction de l'achalandage. Ce dernier n'y est pas mesuré en termes de facteur de charge mais en densité de personnes en position debout (nombre de passagers par mètre carré). Son étude applique un coefficient multiplicateur pour les personnes assises de 1 s'il n'y a aucun passager debout, jusqu'à 1,6 si la densité est de 6 passagers/m². Si les personnes sont debout, le coefficient varie de 1,5 pour une densité nulle, jusqu'à 2 pour une densité de 6 passagers/m². Kroes, Kouwenhoven, Debrincat et Pauget (2014) définissent également deux coefficients multiplicateur de temps suivant le niveau d'achalandage, pour les passager assis ou debout. Il varie de 1 à 1,413 pour les premiers et de 1,289 à 1,604 pour les seconds. Haywood et Koning (2012) sont parvenus à établir un coefficient multiplicateur de temps grâce aux perceptions déclarés par les passagers. Un sondage a en effet été réalisé auprès des usagers, en leur demandant d'évaluer leur niveau de confort dans le métro parisien selon différentes situations d'achalandage illustrées. Le coefficient estimé croît alors de 1 pour 1 passager par m², jusqu'à 1,57 pour 6 passagers par m². Tirachini, Hensher, et Rose (2013) ont testé différentes façons de prendre en compte l'achalandage dans leur modèle. Les résultats concordant le plus avec la perception des individus sont alors obtenus lorsque le modèle inclut à la fois la densité de passagers debout, mais aussi la disponibilité des places assises.

Enfin, van Ort, Drost, Brands et Yap (2015) proposent un coefficient particulier pour évaluer le niveau d'achalandage. Celui-ci considère à la fois l'inconfort généré par l'indisponibilité des places assises en véhicule, comme le facteur de charge, mais aussi l'impossibilité de monter à bord en cas de surcharge du véhicule.

2.5.8 Les aménagements aux arrêts

Le confort d'un trajet en transport en commun ne se mesure pas seulement à bord du véhicule. Il concerne également les aménagements présents aux arrêts où le voyageur attend l'arrivée de son

véhicule. Stratton et al. (2013) recommandent ainsi de prendre en considération une multitude de facteurs pour définir la qualité des arrêts : la proximité de services et de commerces, l'environnement de l'arrêt, les dispositifs d'achat de titre, la facilité de montée à bord, la propreté et la sécurité. Litman (2008) répertorie aussi les bénéfices au voyageur des améliorations apportées dans les arrêts. Par exemple, une amélioration de la propreté rapporte l'équivalent de 1,9 cent au passager, un meilleur service d'accueil 1,3 cent, ou une plateforme rénovée 1 cent. Le NHCRP Report 616 présente une estimation de la valeur de différents aménagements aux arrêts (Dowling & al., 2008). Alors que la présence d'un abri avec toit équivaut à 1,1 minute de bénéfice temps en véhicule, l'éclairage à un arrêt de bus équivaut à 0,7 minute, et des bancs 0,2 minute.

2.5.9 La distorsion géométrique

Un autre facteur est étudié dans une étude de Raveau & al. (2011) : la distorsion géométrique. Le caractère direct d'un trajet est ainsi mesuré, reflétant la déviation qu'un voyageur doit subir pour se rendre de son origine à sa destination. Un coût angulaire est alors défini pour chaque trajet en transport en commun, ce dernier étant élevé pour des trajets indirects et faible pour des trajets plus directs. Deux autres variables sont également intégrées dans leur étude pour mesurer également cette distorsion. La première est la présence d'une correspondance située plus près de l'origine que l'arrêt juste avant. Le trajet donne alors l'impression de revenir en arrière vers le point d'origine. La deuxième est la présence d'une station de correspondance plus loin de la destination que l'arrêt juste avant. Cela donne l'impression de s'éloigner de la destination.

2.5.10 Autres facteurs

La qualité du service de TC peut en réalité revêtir des aspects innombrables. En effet, chaque individu a des attentes et des perceptions totalement différentes envers son trajet. Kroes et al. (2014) proposent ainsi d'autres paramètres à considérer dans la perception du confort en véhicule, en plus des impacts directs de l'achalandage : la stabilité du véhicule, le confort des sièges, la température, les odeurs ou encore le bruit. Raveau et al. (2014) introduisent également une grande variété de paramètres dans leur étude. En plus des variables décrivant la distorsion géométrique, le nombre d'arrêts sur le trajet ou la distance cartographique fournissent des paramètres intéressants pour évaluer la qualité d'un trajet en TC.

2.6 La diversité des routes

Il existe plusieurs raisons de considérer l'ensemble des alternatives offertes lorsqu'il s'agit d'évaluer le service de transport en commun entre une origine et une destination.

C'est notamment l'hypothèse de départ de l'équipe de Nassir, Ziebarth, Sall et Zorn (2014) pour mesurer l'accessibilité du réseau cyclable de San Francisco. En effet, les calculs existants montraient une baisse de l'accessibilité dans certains quartiers pour se rendre au centre-ville en vélo, malgré l'ajout d'une nouvelle piste cyclable. Les chercheurs ont donc entrepris de redéfinir les calculs d'accessibilité, en se basant sur l'hypothèse qu'un réseau offrant une multitude de routes possédant une grande utilité apporte plus de valeurs à l'utilisateur. Ils ont ainsi conçu leur modèle pour qu'il reflète à la fois la diversité et la qualité des diverses routes possibles, pas seulement la meilleure. Ils justifient leur choix par le fait que la performance des routes peut varier dans le temps et certaines peuvent être même inaccessibles à certains moments. Une autre manière de justifier leur choix est que la modélisation classique prend comme hypothèse de départ que les voyageurs ont une connaissance parfaite du réseau. Ils sont sensés agir en « *Homo economicus* » et toujours sélectionner la route qui maximisera leur utilité personnelle (Ortúzar & Willumsen, 2011). Nassir, et al. (2014) jugent que certaines personnes n'ont pas cette connaissance parfaite de leurs alternatives, ou en tout cas ne perçoivent pas la différence d'utilité entre celles-ci. En considérant ainsi plusieurs alternatives dans leur calcul entre deux points, les chercheurs ont ainsi réussi à grandement améliorer la modélisation de l'accessibilité sur le réseau cyclable de San Francisco.

La prise en compte de plusieurs routes pour évaluer le service de transport entre deux points réside également dans le fait que les choix personnels sont très variables. En effet, l'individu possède des préférences envers son trajet qui dépendent en partie de ses caractéristiques sociodémographiques. C'est ce qu'ont montré Nazem et al. (2011) dans leur étude, où l'utilité de 6 catégories de personnes (3 cohortes d'âge et genres) a été estimée pour différentes variables. Les résultats montrent alors que l'utilité varie sensiblement d'un groupe à l'autre. Cela appuie donc le fait de considérer toutes les alternatives disponibles entre une origine et une destination, afin de disposer d'un éventail assez large pour satisfaire les différentes préférences des usagers.

2.7 L'échelle réseau

Certaines études abordent également la question de la qualité et de la diversité des routes disponibles du point de vue réseau, au lieu de se focaliser à l'échelle du trajet. L'ensemble des lignes de TC est alors considéré et des indicateurs peuvent alors être définis comme la vulnérabilité ou la connectivité.

2.7.1 La théorie des graphes

Une vision plus globale d'aborder la façon avec laquelle le TC relie deux points peut être envisagée grâce à la théorie des graphes. Cette théorie mathématique est certes théorique mais elle fournit des indicateurs intéressants pour aborder notre problématique. Gleyze (2001) fournit ainsi un document qui aborde les réseaux de transport de cette manière. Parmi les indicateurs pertinents, on peut notamment citer la k -connexité. Un graphe est dit k -connexe si toute paire de points est reliée par au moins k chemins totalement indépendants. Un parallèle peut ainsi être fait avec les alternatives de TC. Un indice de connexité k peut ainsi être défini pour dénombrer le nombre de chemins indépendants qui relient une origine à une destination dans le réseau de TC.

La connectivité permet aussi de mesurer la diversité des liaisons directes ou indirectes dans un réseau (Gleyze, 2001). Plusieurs indicateurs fournissent un niveau de connectivité. Parmi ceux-ci, on trouve le ratio du nombre d'arêtes du graphe sur le nombre de nœuds, ou encore le nombre cyclomatique, qui représente le nombre de circuits indépendants. Des exemples concrets de mesures de connectivité appliquées à un réseau de transport sont détaillés dans la partie suivante.

2.7.2 La connectivité entre deux points

Certaines études ont défini des indicateurs de connectivité dans un réseau de transport afin de déterminer le niveau d'accessibilité entre deux points. C'est le cas de Mamun et Lownes (2012), qui exposent dans leur étude une méthode pour calculer un score de connectivité dans un réseau de TC. Ce score dépend au total de 4 paramètres : l'existence d'un service de TC entre les deux points (paramètre binaire), l'accessibilité des lignes de transport assurant la liaison, la capacité horaire par habitant des lignes desservant les deux points et enfin une fonction décroissante du temps de trajet entre les deux points. Nassir et al. (2014) utilisent également un niveau

d'accessibilité entre deux points dans leur étude sur le réseau cyclable de San Francisco. Celui-ci se définit par le logarithme de la somme des utilités des différentes alternatives pour relier les deux points, le tout monté à l'exponentielle. L'utilité de chaque chemin inclut également un facteur de correction pour tenir compte de la similarité entre les différentes alternatives. Kaplan, Popoks, Prato et Ceder. (2014) ont également développé une méthode pour calculer la connectivité du TC pour une paire OD. Leur formulation est en réalité une adaptation du calcul de connectivité déjà formulé par Ceder (2007). Elle consiste dans une première étape à former un ensemble de chemins possibles pour relier l'origine et la destination. Ensuite, un ensemble d'indicateurs est formulé pour chaque chemin : temps en véhicule, temps de marche initial, temps de marche en correspondance, temps d'attente, intervalle de service, temps de correspondance et nombre de correspondances. L'étape suivante consiste à calculer sur tous les chemins la moyenne et la variance du temps de marche, d'attente, en véhicule, de l'intervalle de service, le nombre total de correspondances ainsi que la facilité de correspondance. La connectivité entre les deux points est finalement une somme pondérée de tous les éléments cités précédemment.

2.7.3 Les calculs de vulnérabilité

Le but de cette vision plus large est parfois de déterminer la vulnérabilité du réseau en cas d'incident. Cela concerne donc directement le nombre et l'utilité des chemins offerts pour desservir tous les points du réseau, au niveau plus macroscopique. Du, Aiura, Nakatsuji, et Kishi (2014) définissent ainsi une méthodologie afin de déterminer le niveau de vulnérabilité d'une installation k dans un réseau logistique. Celle-ci se calcule en faisant la différence entre le coût de transport en situation normale et celui après dégradation de l'installation k , le tout divisé par le coût en situation normale. Rupi, Angelini, Bernardi, Danesi et Rossi (2015) abordent également le problème en fournissant une méthode permettant de déterminer un classement de vulnérabilité des liens dans un réseau de transport routier. Le niveau d'importance est alors défini par le trafic circulant sur cet axe, mais aussi par la différence de coût engendré par la disparition du lien. La vulnérabilité des liens routiers est également étudiée par Appert et Laurent (2007), qui calculent dans un premier temps la somme des distances minimales entre tous les points du réseau. Le lien en question est ensuite ôté, la même somme est alors calculée. La différence entre les deux sommes représente la vulnérabilité du lien.

2.8 Synthèse du chapitre 2

La revue de littérature répertoriée dans le présent chapitre a d'abord permis de situer le contexte de la problématique dans le cadre général de la modélisation en transport. Le modèle classique à quatre étapes de prévision de la demande est un modèle assez simple théoriquement, mais qui n'en demeure pas moins complexe à mettre en place en pratique. L'étape du choix modal introduit le concept de coût généralisé pour un certain mode de transport. Néanmoins, ce dernier ne prend pas en compte toutes les variables expliquant les décisions individuelles, notamment le nombre et la qualité des alternatives proposées pour un certain mode. L'étape du choix de route nécessite ensuite de constituer un ensemble de trajets disponibles pour réaliser le déplacement, exigeant l'utilisation d'un calculateur de trajet.

Ces différentes alternatives peuvent ensuite être évaluées grâce à différentes variables. La littérature révèle que l'évaluation de la qualité du service de TC a fait l'objet de nombreuses études, qu'elles soient théoriques ou plus pratiques, via l'utilisation de sondages auprès des utilisateurs par exemple. Les mesures concrètes de cette qualité s'effectuent généralement au travers de la perception du temps de l'utilisateur et du concept de fonction d'utilité. Cependant, une multitude d'autres aspects que le temps doivent être considérés (pénibilité de correspondance, fiabilité, confort en véhicule ou encore distorsion du trajet). Par souci de synthèse, les différents travaux liés à la qualité d'un trajet en TC sont référencés dans le Tableau 2.1. Les valeurs numériques disponibles dans les études sont précisées. Dans le cas contraire, la mention « Na » est inscrite pour tout apport de nature qualitative.

Tableau 2.1 Récapitulatif des références sur les différents aspects de la qualité d'un trajet TC
(Na= Non applicable)

<i>Aspects de la qualité d'un trajet en TC</i>	<i>Auteurs</i>	<i>Valeurs</i>
Perception générale du temps	(Kittelson & Associates Inc & al., 2013) Calibration par rapport au temps en véhicule	Temps de marche : 2,2; Temps d'attente : 2,1 ; Temps de correspondance : 2,5
	(Roquigny, 2013) Calibration par rapport au temps réel	Temps de marche : 2 ; Temps d'attente : 1,5; Temps de correspondance : 2
	(Anderson, 2013) Calibration par rapport au temps en véhicule en bus	Voir thèse
Utilisation du temps	(Stratton & al., 2013) (Lyons & Urry, 2005) (Lyons & al., 2007)	Na
Correspondances	(Kaufmann et Messer, 2012) (Hadas & Ranjiktar, 2012) (Iseki & al., 2006)	Na
	(Kittelson & Associates Inc & al., 2013)	Pénalité : 12 à 17 minutes
	(Litman, 2008)	Pénalité : 5 à 15 minutes
	(Bovy & Hoogendoorn-Lanser, 2005)	Pénalités : 5,1 min (haute fréquence) et 11,4 min (basse fréquence)
	(Anderson, 2013) Calibration par rapport au temps en véhicule en bus	Voir thèse Pénalité : 3,8 à 18,9 minutes

Tableau 2.1 Récapitulatif des références sur les différents aspects de la qualité d'un trajet TC
(Na= Non applicable) (suite)

<i>Aspects de la qualité d'un trajet en TC</i>	<i>Auteurs</i>	<i>Valeurs</i>
Temps d'attente/fréquence	(Luethi & al., 2007) (Nielsen, 2000) (Carrel & al., 2013)	Na
	(Anderson, 2013) Calibration par rapport au temps en véhicule en bus	Pénalité : 0,3 à 0,5 minute par minute d'intervalle
Fiabilité du service	(Carrel & al. 2013) (Kittelson & Associates Inc. & al., 2013) (Wood & al., 2015)	Na
	(Roquigny, 2013) Calibration par rapport au temps réel	Pénalité : 2,5 à 7,5 minutes par minutes de retard
Informations en temps réel	(Turnbull & Pratt, 2003) (Gooze & al., 2013) (Watkins & al., 2011) (Dziekan & Vermeulen, 2006)	Na
Achalandage/confort à bord	(Litman, 2008) Coût par minute	Position debout : 2 à 17 cents
	(Dowling & al., 2008) Coût par minute	Position assise : 0,4 à 2,4 cents ; Position debout : 6,1 à 8,9 cents

Tableau 2.1 Récapitulatif des références sur les différents aspects de la qualité d'un trajet TC
(Na= Non applicable) (suite)

<i>Aspects de la qualité d'un trajet en TC</i>	<i>Auteurs</i>	<i>Valeurs</i>
Achalandage/confort à bord	(Whelan & Crockett, 2009) Coefficient multiplicateur du temps à bord du train	Position assise : 1 à 1,6 ; Position debout : 1,5 à 2
	(Kroes & al., 2014) Coefficient multiplicateur du temps en véhicule	Position assise : 1 à 1,4 ; Position debout : 1,3 à 1,6
	(Haywood & Koning, 2012) Coefficient multiplicateur du temps en véhicule	1 à 1,57
	(Tirachini, & al., 2013) (van Ort & al., 2015)	Na
Aménagements aux arrêts	(Stratton et al., 2013)	Na
	(Litman, 2008) (Dowling & al., 2008)	Voir rapport avec valeurs monétaires
Distorsion géométrique	(Raveau & al., 2011)	Na

Enfin, la nécessité de prendre en compte plusieurs alternatives pour un même déplacement a aussi été abordée dans la littérature. Cette diversité de route peut être rapprochée d'autres concepts tels que la vulnérabilité des réseaux ou encore la connectivité entre deux points.

CHAPITRE 3 LES ATTENTES ET PERCEPTIONS DES USAGERS MONTREALAIS

Le troisième chapitre apporte une illustration sur la nécessité de considérer de multiples variables autres que le temps pour évaluer une alternative de TC. Elle contient l'analyse de sondages de plus ou moins grande envergure concernant les attentes et les perceptions des usagers du TC dans la région de Montréal.

3.1 Sondages préliminaires

Cette première partie présente les résultats de sondages réalisés à petite échelle, constituant ainsi une expérimentation de collecte de données. Ils permettent de tester certaines méthodes de sondage et d'en tirer des recommandations en vue de la mise en place de questionnaires à plus grande échelle. Même si les résultats sont assez anecdotiques compte tenu du faible nombre de répondants, ils permettent d'avoir un aperçu des attentes exprimées plus loin dans les sondages organisés par les sociétés de transport.

3.1.1 Sondage étudiants

Le premier sondage s'adressait aux étudiants du groupe de recherche en transport de Polytechnique. Il était alors demandé de fournir une liste des 10 plus grands irritants à prendre en compte dans le cadre de leur choix de trajet pour leurs déplacements en TC. Les réponses ont été regroupées par catégories et celles ayant recueilli au moins 4 votes sont présentées dans le Tableau 3.1.

Tableau 3.1 Classement des catégories d'irritant du sondage étudiant (N=14)

Catégories d'irritant	Nombre de réponses
Temps d'attente trop long	12
Manque de fiabilité et retards	8
Pannes de métro	7
Achalandage trop important	7
Mauvaise accessibilité	7
Manque de synchronisation entre les lignes	6
Chaleur trop importante en véhicule	6
Incivilités	6
Passagers sales/malodorants	5
Tarification élevée	4
Trajet trop long	4
Manque de propreté	4
Absence d'abribus	4

Ainsi, le temps d'attente trop long, autrement dit la fréquence trop faible du service, apparaît comme l'irritant majeur des étudiants interrogés. Viennent ensuite le manque de fiabilité et les pannes de métro. À noter que ce dernier aspect peut être considéré comme une sous-catégorie du manque de fiabilité.

3.1.2 Sondage Delphi professionnels

Un autre type de sondage a été testé pour tenter de cerner les irritants dans le TC. Le public visé a été différent puisqu'il s'agissait de professionnels dans le milieu du transport montréalais. La méthode utilisée, appelée « Delphi », consiste à consulter des "experts" sur un sujet

encore exploratoire, afin d'orienter pertinemment les réflexions en la matière. Le but est d'obtenir un consensus sur le sujet, via un processus itératif de questions posés à ces "experts". Les questions sont traitées de manière individuelle pour ne pas que les répondants s'influencent entre eux, mais un retour sur les réponses précédentes est effectué à chaque itération. À la fin du processus, les « experts » se sont entendus sur le sujet à traiter.

La première itération consistait à effectuer une liste de 10 irritants ou désagréments que les experts jugeaient importants à prendre en compte dans le cadre d'un choix de trajet pour les déplacements en TC. Cette liste devait être ordonnée par importance relative d'irritant. Les irritants envoyés ont ensuite été catégorisés et classés selon le nombre et le poids des réponses. Ce classement est présenté dans le Tableau 3.2.

Tableau 3.2 Classement des catégories d'irritants de la 1^{ère} itération du sondage Delphi

Position	Catégories d'irritants
1	Manque de fiabilité du service (variabilité du temps d'attente et de parcours)
2	Fréquence du service trop faible (temps d'attente trop long)
3	Nombre de correspondances important
4	Temps de trajet total trop long
5	Manque de synchronisme entre les lignes (temps de correspondance important)
6	Achalandage du véhicule trop important
7	Inconfort en véhicule (température, qualité des équipements etc.)
8	Distance d'accès au service trop longue (origine et destination)
9	Inconfort à l'arrêt (abribus, bancs etc.)
10	Manque de sécurité
11	Manque d'information à l'arrêt
12	Tarifs importants et achat de titres compliqué

Tableau 3.3 Classement des catégories d'irritants de la 1^{ère} itération du sondage Delphi (suite)

Position	Catégories d'irritants
13	Conduite du véhicule trop brusque
14	Manque de places de stationnement incitatif
15	Manque d'information pour planifier le déplacement
16	Incivilités et manque de convivialité en véhicule
17	Pannes ou arrêts de service fréquents
18	Transport de bagages ou charges trop compliqué

Le nombre de réponses N n'est pas précisé car certains répondants se sont regroupés pour envoyer une réponse commune au sondage. Toutefois, 5 réponses au total ont été considérées, qu'elles soient individuelles ou en groupe. Le premier irritant est ainsi le manque de fiabilité, suivi de la fréquence trop faible et du nombre important de correspondances.

3.1.3 Sondage par télévotateur

Une autre façon d'interroger les personnes sur leurs préférences et leurs attitudes face au TC s'est déroulée lors du 5^{ème} colloque de la Chaire Mobilité le 26 mai 2015. Lors d'une présentation, les participants étaient appelés à répondre à diverses questions par télévotateur. L'assistance était composée d'une centaine d'étudiants et de professionnels du milieu du transport montréalais.

La première question demandait de donner les 3 critères, par ordre d'importance, qui déterminent le choix du trajet TC des répondants. Les réponses obtiennent 3 points si elles sont citées en 1^{ère} position, 2 points en 2^{ème} et 1 point en 3^{ème}. Les scores pour chacun des 5 critères proposés, transformés en pourcentage, sont présentés dans la Figure 3.1.

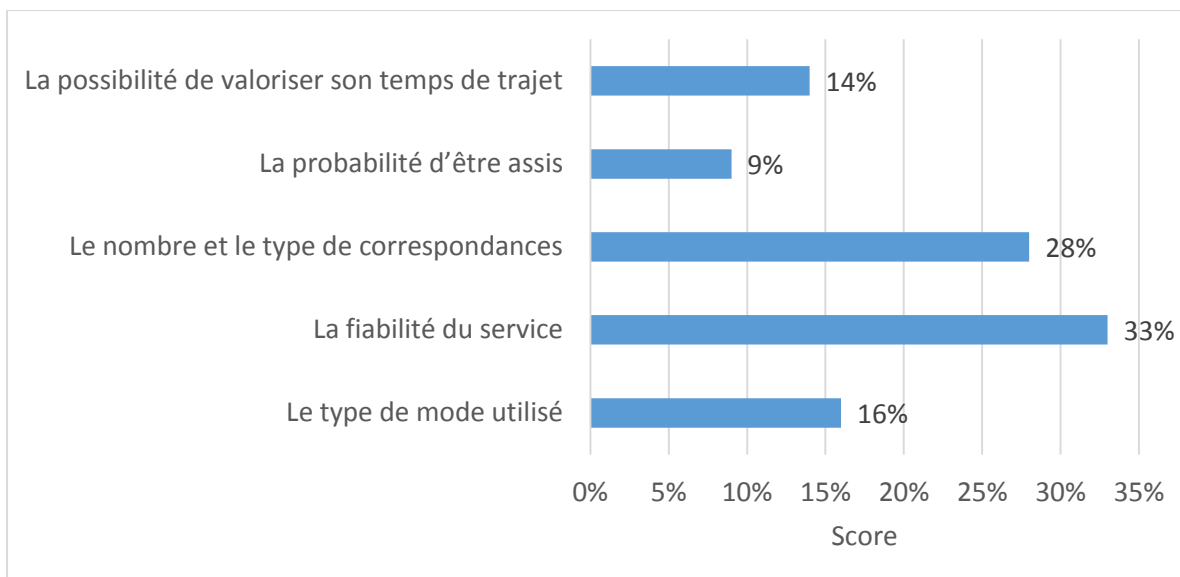


Figure 3.1 Score des différents facteurs d'influence dans le choix du trajet TC

La fiabilité et les correspondances sont ainsi les deux principaux aspects qui influencent le choix du trajet lorsque les répondants doivent effectuer un déplacement en TC.

La seconde question s'intéressait au nombre d'alternatives disponibles pour réaliser le trajet en TC. Il était ainsi demandé si le fait d'avoir une deuxième alternative TC pour réaliser leur déplacement avait un impact sur leur utilisation de ce mode. Les résultats sont présentés ci-après dans la Figure 3.2.

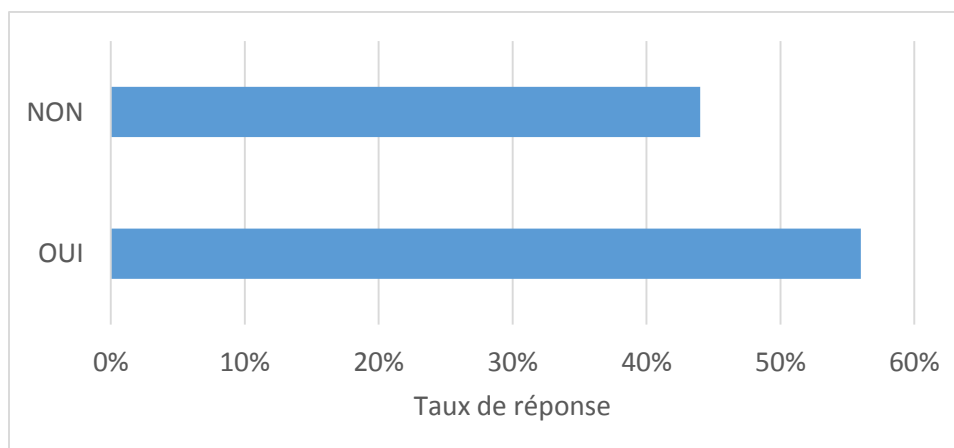


Figure 3.2 Influence d'une 2^{ème} alternative sur le choix du TC des répondants

Plus de la moitié des répondants déclare ainsi que posséder une deuxième alternative de TC pour réaliser leur trajet les encourage à emprunter ce mode.

Pour finir, il était supposé que le trajet le plus rapide en TC disponible prenait 30 min. Les personnes étaient alors interrogées sur la durée maximale d'un autre trajet pour qu'elles le considèrent encore comme une alternative. La Figure 3.3 montre les réponses à cette question.

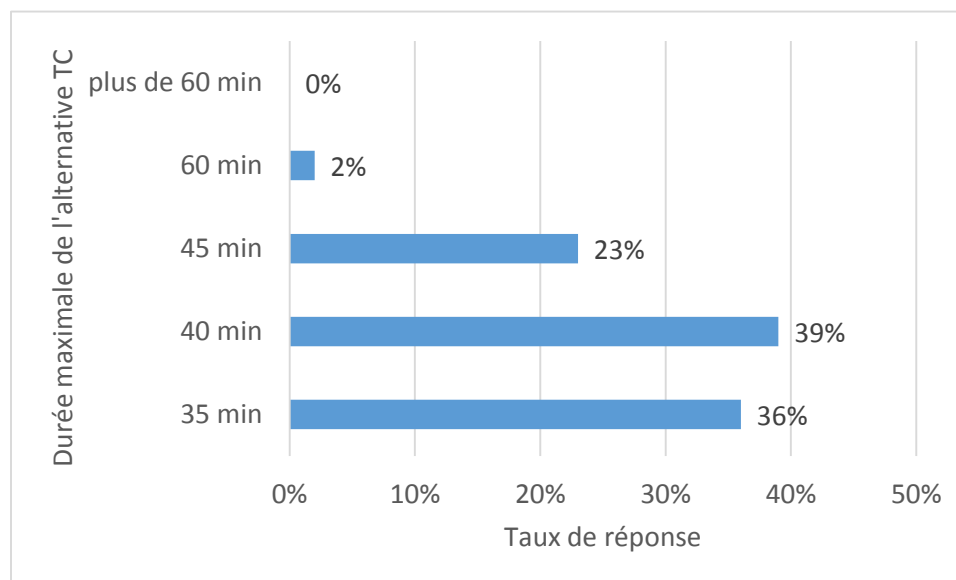


Figure 3.3 Seuils de temps pour qu'un trajet TC soit considéré comme une alternative

Ainsi, ce sont $\frac{3}{4}$ des répondants qui estiment que si leur meilleure alternative de TC prend 30 min, une alternative convenable ne doit pas dépasser 10 min de temps de trajet additionnel. Ils ne sont aussi plus que 2% à considérer qu'un trajet qui double leur meilleur temps, pour atteindre une heure, est une alternative envisageable.

3.2 Les recommandations des usagers de l'AMT

L'Agence Métropolitaine de Transport (AMT) réalise à chaque année en septembre une enquête à bord des trains de banlieue montréalais afin, entre autres, de mieux connaître les attentes des clients. Dans le questionnaire distribué, la dernière question posée demande d'identifier les améliorations requises pour que les usagers soient très satisfaits du service de train de banlieue. Les deux enquêtes présentées ici ont eu lieu en septembre 2012 et septembre 2013 sur les différentes lignes du réseau, pour lesquelles respectivement près de 40000 et 37000 commentaires ont été émis. Il est à noter que les réponses sont spontanées et qu'aucun choix de réponse n'était présent. 10% des commentaires reçus sont ensuite lus et codifiés à partir d'une

grille de codification élaborée à l'interne par l'AMT de façon à les regrouper par grande catégorie. Cette méthode permet d'identifier les attentes principales propres à chaque ligne suivant ses spécificités, mais les attentes sont ici étudiées pour toutes les lignes regroupées par souci de simplification. Les catégories d'améliorations émises par les usagers sont présentées dans la Figure 3.4.

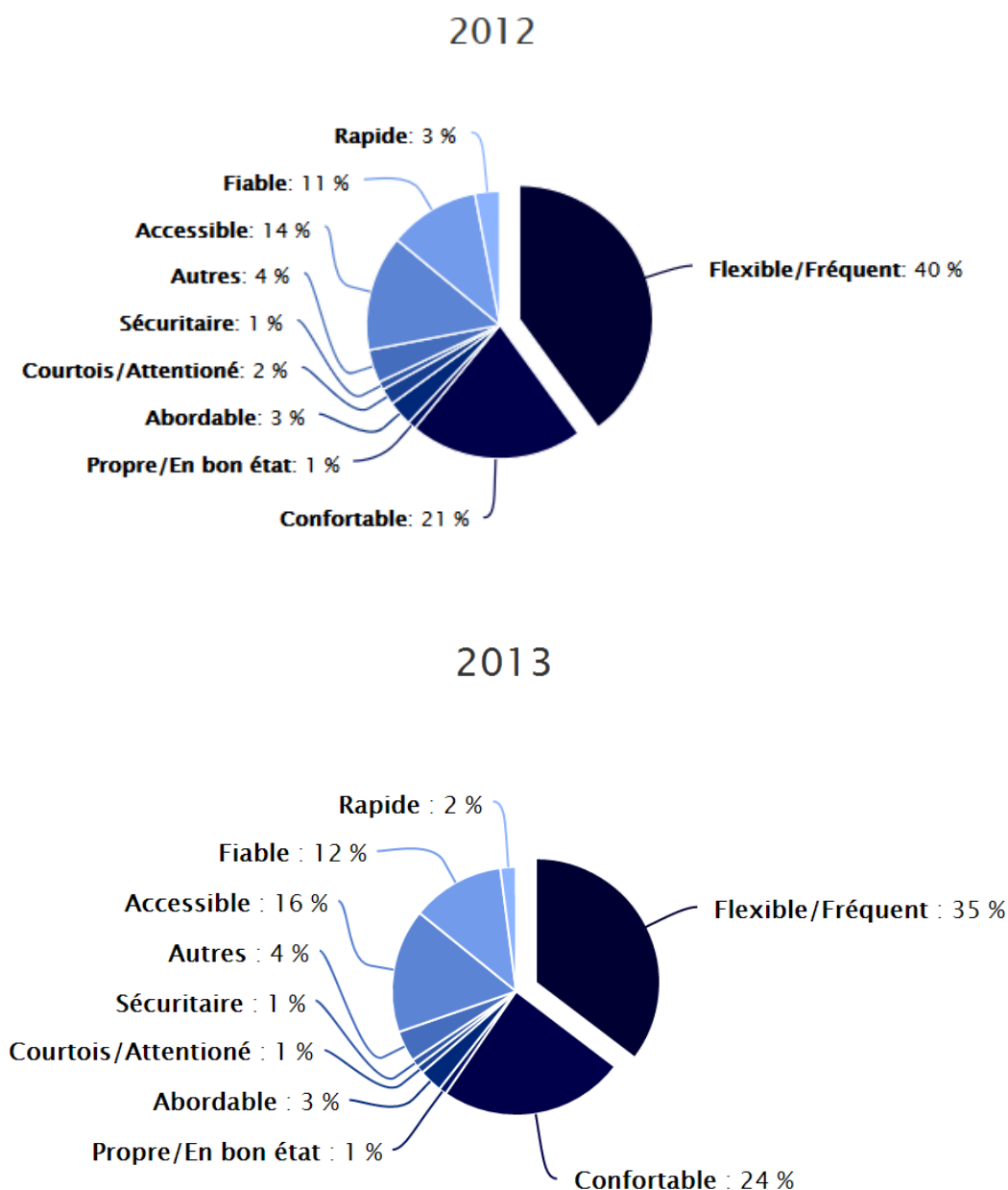


Figure 3.4 Répartition des catégories de commentaires émis par les usagers du train de banlieue en 2012 et 2013 © AMT, 2015. Reproduit avec permission.

Les résultats montrent clairement que les attentes des utilisateurs concernent principalement la flexibilité et la fréquence du service, puisque cela représente respectivement 40% et 35% des commentaires émis en 2012 et 2013. Les améliorations attendues concernent également dans une grande mesure le confort, l'accessibilité et la fiabilité, avec un total de 46% pour les trois catégories en 2012 et 52% en 2013.

3.3 Les attentes du panel de la STM

Un sondage auprès d'un panel d'utilisateurs a été réalisé par la Société de Transport de Montréal (STM). Ce panel ne reflète cependant pas parfaitement la population des utilisateurs, puisque certaines catégories sociodémographiques sont surreprésentées, comme les personnes âgées et les femmes. Le Tableau 3.4 présente ainsi la répartition des participants du panel par âge et par sexe, en comparaison avec la répartition de l'enquête Origine-Destination 2013. De plus, la proportion d'utilisateurs réguliers est plus importante que dans la réalité. Le sondage étudié ici a été mené en décembre 2014 sur une plateforme Web. Les participants devaient d'abord choisir le mode qu'ils utilisaient d'habitude (métro, bus ou les deux), ainsi que l'utilisation qu'ils en faisaient (régulier ou occasionnel).

Tableau 3.4 Comparaison entre la répartition des catégories sociodémographiques de l'échantillon et celle de l'enquête OD 2013

Catégorie	N	% échantillon	% OD2013
<i>< 18 ans</i>	20	0%	5%
<i>18 - 24 ans</i>	1 250	15%	24%
<i>25 - 34 ans</i>	2 364	28%	23%
<i>35 - 44 ans</i>	1 699	20%	16%
<i>45 - 54 ans</i>	1 395	16%	15%
<i>55 - 64 ans</i>	1 270	15%	10%
<i>> 65 ans</i>	551	6%	7%
<i>Homme</i>	3 530	41%	44%
<i>Femme</i>	5 019	59%	56%

La première question concerne les utilisateurs du métro. Ces derniers avaient à leur disposition une liste d'attentes vis-à-vis de ce mode, dont ils devaient évaluer l'importance sur une échelle de 1 (peu important) à 10 (très important). Les résultats sont présentés dans le Tableau 3.5 et le Tableau 3.6.

Tableau 3.5 Évaluation de l'importance de certaines attentes par les utilisateurs réguliers du métro (N=1288)

	Ne s'applique pas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Moyenne
Fréquence	0%	0%	0%	0%	0%	1%	2%	4%	14%	21%	58%	9,28
Courtoisie loge du métro	0%	2%	1%	2%	2%	5%	7%	11%	18%	14%	34%	8,05
Propreté	0%	0%	0%	1%	1%	3%	7%	15%	23%	19%	30%	8,29
Fonctionnement des escalators	0%	4%	1%	3%	3%	7%	9%	15%	18%	11%	29%	7,54
Sécurité	0%	1%	1%	0%	1%	2%	5%	9%	16%	17%	47%	8,71
Douceur du roulement	0%	2%	1%	3%	4%	9%	14%	18%	20%	12%	17%	7,25
Infos sur les interruptions de service	0%	0%	0%	0%	1%	1%	3%	7%	16%	17%	54%	9,01
Disponibilité des places assises	0%	3%	1%	3%	4%	7%	13%	16%	18%	11%	24%	7,39
Accès point d'appui	0%	2%	1%	2%	2%	5%	7%	13%	20%	16%	31%	7,98
Niveau entassement	0%	0%	0%	1%	1%	2%	5%	11%	20%	17%	42%	8,60
Température	0%	1%	0%	2%	2%	5%	10%	16%	21%	15%	26%	7,87
Qualité air	0%	0%	0%	1%	1%	3%	6%	12%	21%	17%	38%	8,46
Bruit	0%	3%	2%	3%	5%	10%	16%	19%	19%	10%	13%	6,90
Heures de fermeture	0%	4%	2%	2%	3%	7%	8%	13%	13%	14%	30%	7,54
Synchronisation des correspondances	0%	1%	0%	1%	2%	4%	6%	12%	18%	18%	37%	8,32
Facilité d'orientation	0%	1%	1%	2%	2%	6%	9%	14%	22%	14%	28%	7,92
Fiabilité du service	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	2%	7%	13%	75%	9,58

Tableau 3.6 Évaluation de l'importance de certaines attentes par les utilisateurs occasionnels du métro (N=444)

	Ne s'applique pas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Moyenne
Fréquence	0%	0%	0%	0%	0%	2%	1%	7%	19%	26%	45%	9,28
Courtoisie loge du métro	1%	1%	2%	1%	2%	5%	7%	11%	19%	14%	36%	8,05
Propreté	0%	0%	0%	1%	1%	3%	6%	12%	24%	18%	34%	8,29
Fonctionnement des escalators	1%	3%	1%	2%	3%	8%	10%	14%	15%	14%	29%	7,54
Sécurité	1%	1%	0%	1%	1%	3%	3%	10%	20%	14%	48%	8,71
Douceur du roulement	0%	1%	2%	2%	4%	8%	14%	19%	19%	15%	16%	7,25
Infos sur les interruptions de service	1%	0%	0%	1%	0%	2%	7%	8%	16%	17%	47%	9,01
Disponibilité des places assises	0%	2%	2%	4%	5%	8%	13%	13%	20%	13%	21%	7,39
Accès point d'appui	1%	2%	1%	2%	2%	6%	6%	14%	20%	16%	30%	7,98
Niveau entassement	2%	0%	0%	1%	2%	4%	7%	15%	21%	18%	29%	8,60
Température	0%	0%	1%	0%	3%	7%	12%	16%	20%	14%	26%	7,87
Qualité air	0%	0%	0%	1%	0%	3%	5%	11%	20%	20%	38%	8,46
Bruit	0%	1%	2%	5%	5%	6%	16%	18%	22%	11%	14%	6,90
Heures de fermeture	3%	2%	4%	2%	5%	7%	7%	16%	16%	14%	24%	7,54
Synchronisation des correspondances	1%	0%	1%	0%	2%	3%	7%	14%	19%	19%	33%	8,32
Facilité d'orientation	1%	0%	1%	1%	2%	4%	7%	12%	20%	19%	32%	7,92
Fiabilité du service	1%	0%	0%	0%	0%	1%	1%	3%	11%	16%	68%	9,58

Ainsi, les utilisateurs réguliers et occasionnels du métro s'accordent pour donner une très grande importance à la fiabilité du service, avec un score de 9,58 en moyenne pour les deux. La fréquence, la sécurité et les informations durant les interruptions de service apparaissent aussi comme des enjeux majeurs à leurs yeux, dans des proportions similaires. La principale différence entre les deux types d'utilisateurs s'observe sur la répartition des scores attribués aux différentes catégories. Alors que les réguliers attribuent des notes plus tranchées, les occasionnels sont plus mesurés. Par exemple, la fiabilité du service a reçu 75% de note 10 chez les réguliers contre 68% chez les occasionnels pour une moyenne identique de 9,58, la fréquence a obtenu 58 % de 10 chez les réguliers contre 45 % chez les occasionnels pour une moyenne identique de 9,28.

La seconde question s'intéresse aux mêmes attentes face au métro, mais les utilisateurs devaient cette fois-ci choisir les 5 plus importantes selon eux parmi les choix proposés. Les résultats sont présentés dans le Tableau 3.7.

Tableau 3.7 Nombre et pourcentage d'usagers du métro ayant cité l'attente correspondante parmi leurs 5 plus importantes

Réguliers (N=1288)			Occasionnels (N=444)		
Fiabilité du service	1040	81%	Fiabilité du service	332	75%
Fréquence	941	73%	Fréquence	285	64%
Infos sur les interruptions de service	562	44%	Sécurité	222	50%
Sécurité	555	43%	Infos sur les interruptions de service	166	37%
Niveau entassement	547	42%	Propreté	134	30%
Synchronisation des correspondances	395	31%	Niveau entassement	128	29%
Propreté	335	26%	Synchronisation des correspondances	126	28%
Heures de fermeture	305	24%	Qualité d'air	119	27%
Température	290	23%	Fonctionnement des escalators	117	26%
Disponibilité des places assises	281	22%	Heures de fermeture	98	22%
Qualité d'air	277	22%	Courtoisie loge du métro	89	20%
Fonctionnement des escalators	270	21%	Accès point d'appui	89	20%
Accès point d'appui	217	17%	Disponibilité des places assises	86	19%
Courtoisie loge du métro	152	12%	Température	84	19%
Facilité d'orientation	106	8%	Facilité d'orientation	79	18%
Douceur du roulement	84	7%	Douceur du roulement	27	6%
Bruit	61	5%	Bruit	22	5%

Comme on peut le constater, presque tous les utilisateurs du métro (réguliers ou occasionnels) ont cité la fiabilité et la fréquence comme des attentes importantes dans leur utilisation de ce mode. Les informations sur les interruptions de service et la sécurité constituent aussi des facteurs importants. Cela concorde avec les résultats précédents, d'autant plus que les scores entre réguliers et occasionnels divergent aussi légèrement. En effet, respectivement 81% et 73% des réguliers ont cité la fiabilité et la fréquence comme attente prioritaire, contre 75% et 64% pour les occasionnels.

La même série de questions a été posée pour les utilisateurs du bus. Les résultats sont présentés dans le Tableau 3.8 et le Tableau 3.9.

Tableau 3.8 Évaluation de l'importance de certaines attentes par les utilisateurs réguliers du bus (N=1015)

	Ne s'applique pas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Moyenne
Fréquence	0%	0%	0%	0%	0%	1%	1%	4%	7%	11%	74%	9,44
Ponctualité du bus	0%	0%	0%	0%	0%	1%	2%	3%	6%	11%	76%	9,49
Courtoisie des chauffeurs	1%	1%	0%	1%	2%	2%	5%	12%	22%	16%	37%	8,43
Propreté	0%	0%	0%	0%	1%	3%	8%	16%	24%	17%	29%	8,20
Sécurité	1%	1%	0%	1%	1%	4%	7%	10%	19%	17%	39%	8,43
Démarrage, conduite et arrêt du bus	1%	0%	0%	1%	1%	3%	4%	9%	18%	19%	43%	8,62
Respect sécurité routière	1%	1%	0%	1%	1%	2%	3%	8%	16%	17%	50%	8,87
Disponibilité des places assises	1%	2%	1%	1%	3%	5%	10%	14%	21%	14%	28%	7,90
Accès point d'appui	2%	1%	0%	1%	1%	2%	5%	11%	19%	15%	43%	8,58
Niveau d'entassement	1%	1%	0%	1%	2%	2%	4%	10%	19%	17%	43%	8,63
Température	1%	1%	0%	1%	2%	4%	7%	17%	23%	14%	30%	8,12
Qualité d'air	1%	1%	1%	1%	1%	4%	8%	17%	22%	15%	29%	8,07
Couverture du territoire	3%	0%	0%	0%	1%	2%	4%	8%	16%	19%	46%	8,77
Qualité des infos du chauffeur	5%	1%	1%	2%	2%	4%	8%	12%	18%	15%	33%	8,14
Infos perturbations du réseau	3%	1%	0%	0%	1%	2%	3%	8%	12%	16%	53%	8,87
Infos aux arrêts	2%	1%	0%	1%	2%	3%	7%	10%	18%	17%	39%	8,45

Tableau 3.9 Évaluation de l'importance de certaines attentes par les utilisateurs occasionnels du bus (N=312)

	Ne s'applique pas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Moyenne
Fréquence	1%	0%	0%	0%	1%	1%	3%	3%	11%	12%	68%	9,31
Ponctualité du bus	1%	0%	0%	1%	1%	0%	2%	4%	9%	16%	67%	9,36
Courtoisie des chauffeurs	1%	0%	1%	0%	0%	3%	6%	10%	16%	23%	40%	8,65
Propreté	0%	0%	0%	1%	0%	3%	9%	14%	24%	16%	33%	8,33
Sécurité	1%	1%	0%	1%	2%	2%	6%	11%	17%	19%	41%	8,55
Démarrage, conduite et arrêt du bus	0%	1%	1%	1%	0%	2%	6%	11%	18%	18%	43%	8,64
Respect sécurité routière	1%	1%	0%	0%	0%	1%	3%	5%	15%	21%	53%	9,02
Disponibilité des places assises	1%	2%	1%	2%	2%	4%	8%	13%	23%	15%	29%	7,97
Accès point d'appui	2%	1%	1%	1%	1%	3%	4%	5%	20%	22%	41%	8,66
Niveau d'entassement	1%	1%	1%	1%	2%	2%	5%	11%	21%	19%	36%	8,42
Température	1%	1%	0%	2%	2%	5%	8%	16%	23%	15%	28%	8,00
Qualité d'air	1%	0%	1%	1%	1%	4%	8%	14%	23%	18%	29%	8,23
Couverture du territoire	3%	0%	1%	0%	1%	4%	4%	5%	18%	23%	40%	8,68
Qualité des infos du chauffeur	6%	1%	1%	0%	2%	4%	7%	9%	20%	21%	29%	8,26
Infos perturbations du réseau	4%	0%	1%	1%	1%	2%	5%	8%	14%	20%	43%	8,66
Infos aux arrêts	2%	1%	1%	2%	1%	4%	7%	9%	17%	16%	41%	8,39

À l'image des utilisateurs du métro, les usagers du bus accordent une très forte importance à la fréquence et à la ponctualité du service. Les réguliers leur accordent une moyenne respective de 9,44 et 9,49, les occasionnels 9,31 et 9,36. Le respect de la sécurité routière et les informations sur les perturbations du réseau obtiennent également une haute moyenne. Le même clivage entre réguliers et occasionnels s'observe également pour les usagers du bus. Si les réguliers sont respectivement 74% et 76% à donner la note de 10 pour la fréquence et la ponctualité, ils ne sont plus que 68% et 67% chez les occasionnels.

De même, les usagers du bus devaient sélectionner parmi ces attentes les 5 plus importantes pour eux. Les résultats sont présentés dans le Tableau 3.10.

Tableau 3.10 Nombre et pourcentage d'usagers du bus ayant cité l'attente correspondante parmi leurs 5 plus importantes

Réguliers (N=1015)			Occasionnels (N=312)		
Fréquence	863	85%	Fréquence	246	79%
Ponctualité	857	84%	Ponctualité	243	78%
Niveau d'entassement	453	45%	Démarrage, conduite et arrêt du bus	137	44%
Démarrage, conduite et arrêt du bus	429	42%	Niveau d'entassement	119	38%
Disponibilité des places assises	331	33%	Respect sécurité routière	107	34%
Infos perturbations du réseau	266	26%	Disponibilité des places assises	95	30%
Couverture du territoire	260	26%	Couverture du territoire	90	29%
Sécurité	256	25%	Sécurité	85	27%
Courtoisie des chauffeurs	249	25%	Courtoisie des chauffeurs	79	25%
Respect sécurité routière	224	22%	Accès point d'appui	72	23%
Accès point d'appui	207	20%	Infos perturbations du réseau	65	21%
Infos aux arrêts	171	17%	Infos aux arrêts	58	19%
Propreté	167	16%	Propreté	56	18%
Température	156	15%	Température	41	13%
Qualité d'air	92	9%	Qualité d'air	36	12%
Qualité des infos du chauffeur	58	6%	Qualité des infos du chauffeur	21	7%

La fréquence et la ponctualité sont ainsi citées par une grande majorité des utilisateurs de bus comme une attente importante. Cela correspond avec les scores précédemment observés. De plus, le niveau d'entassement et la conduite du chauffeur sont également des aspects importants. Encore une fois, l'importance des deux premières attentes est plus claire chez les réguliers avec une occurrence respective de 85% et 84%, contre 79% et 78% chez les occasionnels.

3.4 Les perceptions des Longueuillois

Un autre sondage a été organisé par le Réseau de Transport de Longueuil (RTL) en 2013. Une enquête téléphonique, suivie d'une enquête web plus approfondie pour les volontaires, ont été menées auprès de citoyens de l'agglomération de Longueuil.

Volet téléphonique

Les résultats de cette partie concernent spécifiquement l'enquête téléphonique. Il est à noter que pour certaines questions, les interlocuteurs pouvaient choisir l'option « Autre » et proposer leur propre réponse. Dans ce cas, ces réponses ont été post-traitées afin de les regrouper avec des propositions de réponses déjà présentes si nécessaire. De plus, des questions d'identification préliminaires ont permis de classer les répondants suivant leur profil de mobilité : utilisateurs de l'automobile fermés au TC, utilisateurs de l'automobile ouverts au TC et utilisateurs du TC.

La première question consistait à attribuer une note de 1 à 10 suivant l'importance d'éléments proposés dans le choix du mode de transport. Les résultats suivant le profil du répondant sont présentés dans le Tableau 3.11, le Tableau 3.12 et le Tableau 3.13.

Tableau 3.11 Évaluation de l'importance de certaines attentes par les utilisateurs du TC (N=836)

	Je ne sais pas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Moyenne
Fréquence	0%	0%	0%	1%	1%	2%	2%	9%	27%	22%	35%	8,50
Proximité et facilité d'accès	0%	1%	1%	1%	0%	1%	3%	7%	26%	24%	34%	8,44
Niveau de détente/confort/sécurité	0%	1%	1%	0%	1%	5%	5%	18%	31%	13%	24%	7,97
Fiabilité (respect heure arrivée)	0%	0%	0%	0%	0%	2%	2%	7%	22%	23%	42%	8,76
Temps de parcours	0%	0%	0%	0%	0%	3%	3%	13%	26%	21%	30%	8,38
Facilité du parcours	0%	1%	0%	1%	1%	3%	5%	14%	29%	20%	25%	8,10
Flexibilité	0%	1%	0%	0%	2%	4%	5%	13%	29%	18%	25%	7,89

Tableau 3.12 Évaluation de l'importance de certaines attentes par les automobilistes ouverts au TC (N=1237)

	Je ne sais pas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Moyenne
Niveau de détente/confort/sécurité	1%	2%	0%	1%	0%	4%	4%	7%	23%	10%	48%	8,48
Fiabilité (respect heure arrivée)	0%	4%	0%	0%	1%	4%	1%	6%	16%	13%	54%	8,64
Temps de parcours	1%	4%	1%	2%	2%	4%	4%	8%	20%	13%	41%	8,09
Facilité du parcours	1%	2%	0%	2%	3%	3%	5%	9%	16%	11%	48%	8,36
Flexibilité	2%	3%	0%	2%	0%	4%	4%	8%	17%	12%	48%	8,27

Tableau 3.13 Évaluation de l'importance de certaines attentes par les automobilistes fermés au TC (N=703)

	Je ne sais pas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Moyenne
Niveau de détente/confort/sécurité	0%	1%	0%	0%	0%	2%	3%	11%	26%	16%	41%	8,63
Fiabilité (respect heure arrivée)	0%	2%	0%	1%	1%	1%	2%	8%	19%	16%	48%	8,61
Temps de parcours	0%	2%	0%	1%	1%	5%	4%	12%	26%	16%	32%	8,10
Facilité du parcours	0%	1%	0%	0%	1%	3%	4%	11%	26%	14%	38%	8,39
Flexibilité	1%	2%	0%	0%	0%	2%	2%	8%	21%	13%	49%	8,62

Ces tableaux nous montrent clairement l'importance de la fiabilité, la fréquence et de l'accessibilité dans les attentes des utilisateurs du TC. Ces derniers accordent cependant moins d'importance au niveau de détente/confort/sécurité et à la flexibilité dans leur choix de moyen de transport de transport que les automobilistes. Il est aussi à noter le score élevé de la fiabilité chez les automobilistes, ouverts ou fermés au TC. Le Tableau 3.11, le Tableau 3.12 et le Tableau 3.13 permettent de constater la distribution des notes attribuées aux attentes selon le type de profil. Ainsi, les usagers du TC semblent être plus partagés sur le niveau de détente/confort/sécurité, la facilité du parcours et la flexibilité que les automobilistes. De plus, mis à part la flexibilité, les automobilistes ouverts au TC attribuent des scores de 10 sur les différentes attentes plus fréquemment que les automobilistes fermés au TC.

La seconde question s'intéresse au déplacement le plus fréquent effectué par les répondants. Pour ce dernier, il est demandé de sélectionner dans une liste la principale raison expliquant le choix du mode utilisé, à savoir l'automobile ou le TC. Les résultats pour les utilisateurs du TC et les automobilistes sont présentés dans la Figure 3.5 et la Figure 3.6.

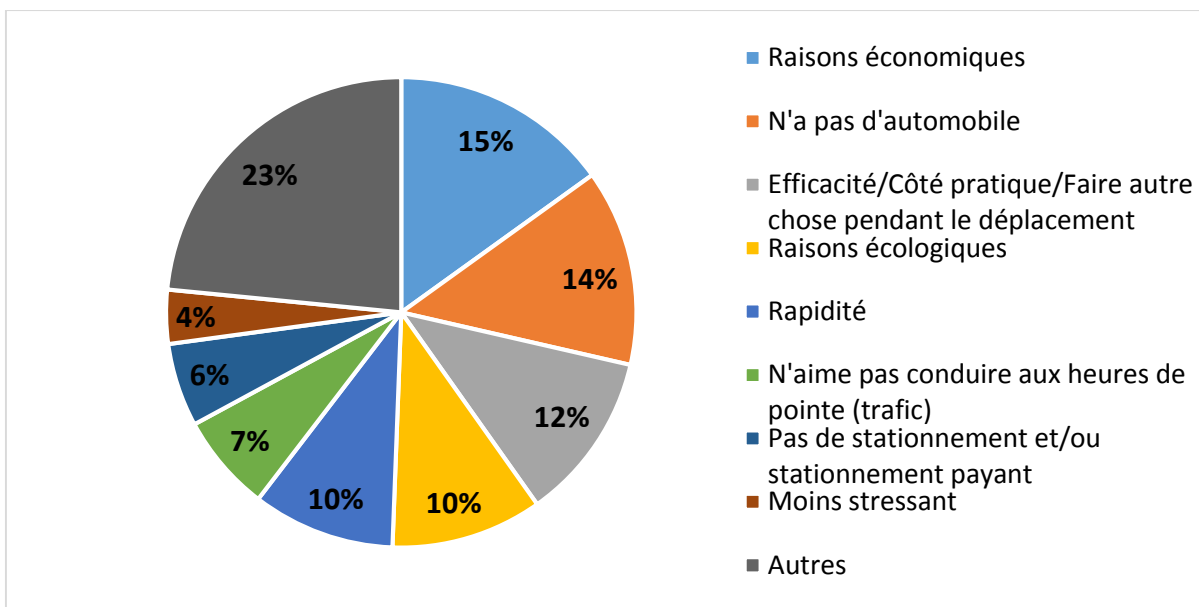


Figure 3.5 Répartition des raisons du choix de mode pour les utilisateurs du TC (N=836)

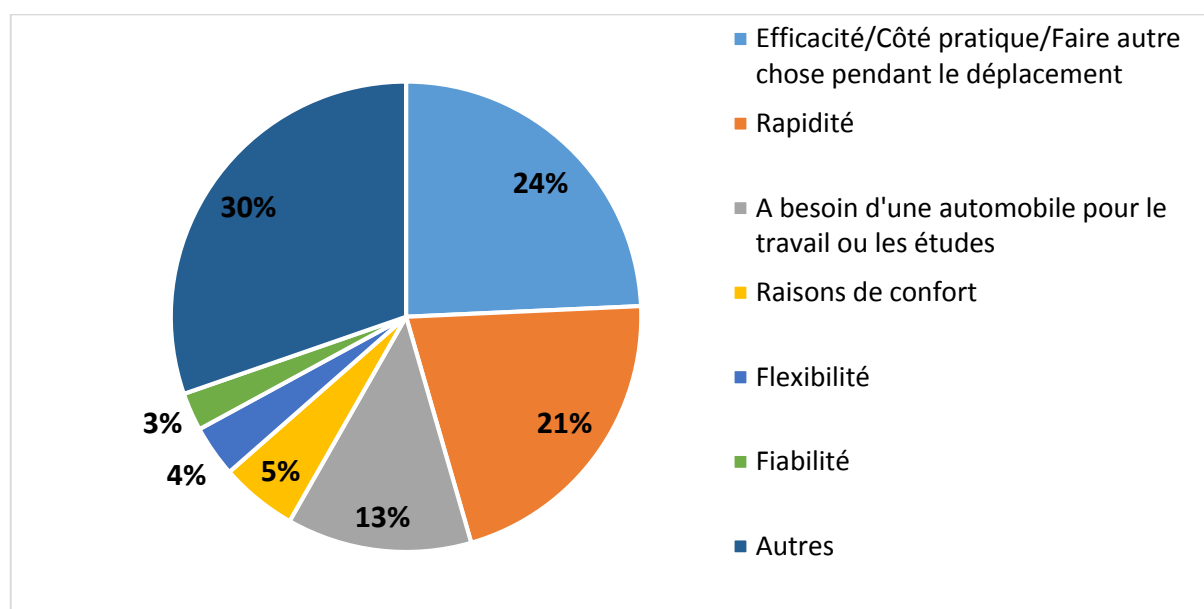


Figure 3.6 Répartition des raisons du choix de mode pour les automobilistes (N=1722)

Ainsi, les raisons invoquées par les Longueuillois pour expliquer leur choix de mode varient beaucoup entre le TC et l'automobile. Pour les utilisateurs du premier mode, la principale raison évoquée est économique, suivie par la non-motorisation et l'efficacité/côté pratique/possibilité de

faire autre chose. Pour les utilisateurs de second, leur choix s'explique en premier par l'efficacité/côté pratique/possibilité de faire autre chose, la rapidité puis le besoin de l'automobile dans la journée.

La question suivante s'intéresse plus particulièrement aux automobilistes. Il leur est demandé la principale raison pour laquelle ils n'utilisent pas le TC dans leur déplacement principal. Les résultats sont présentés dans la Figure 3.7.

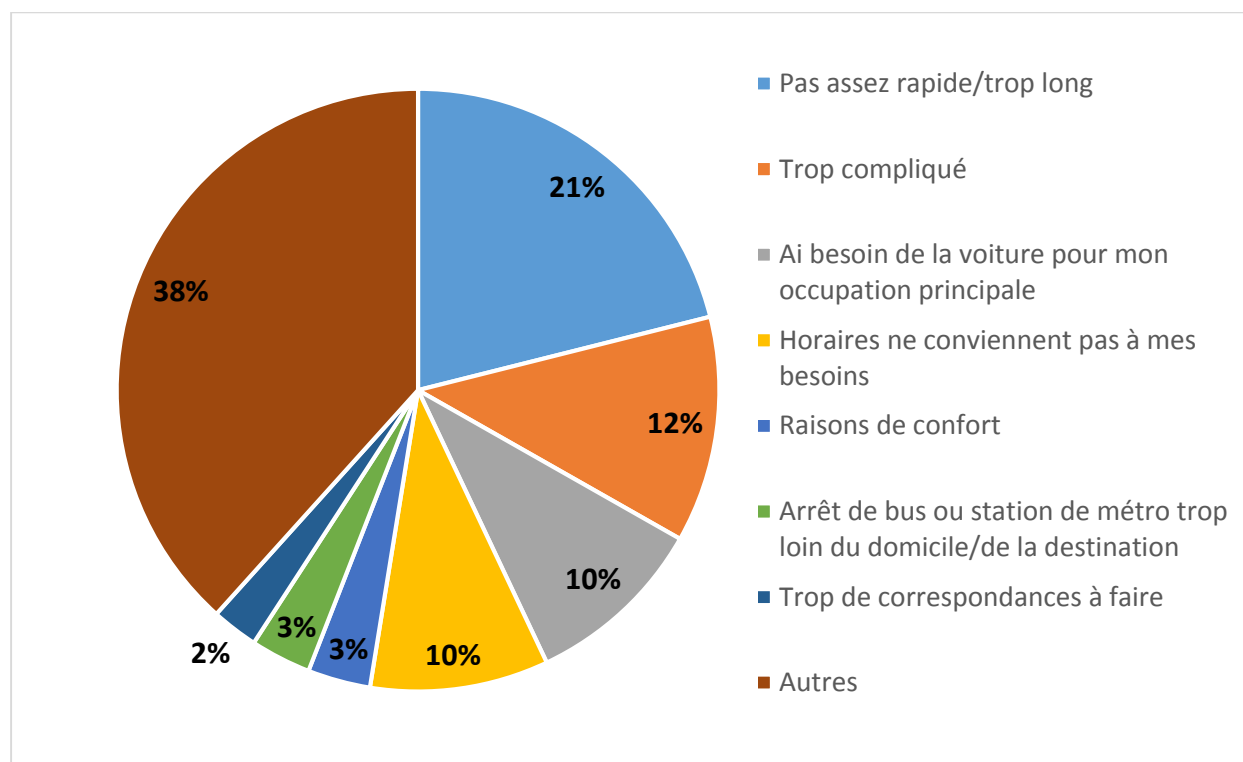


Figure 3.7 Répartition des raisons pour lesquelles le TC n'est pas choisi pour les automobilistes (N=1722)

Pour 21% d'entre eux, le TC n'est pas assez rapide pour assurer leur déplacement le plus fréquent. Ensuite, le mode est trop compliqué pour 12%, l'automobile est indispensable dans leur journée pour 10% et les horaires ne correspondent pas à leur besoin pour 10%.

Volet web

Parmi les différentes questions figurant sur le questionnaire web, une d'entre elles concerne les retards. Il est ainsi demandé le seuil de retard en TC à partir duquel celui-ci est considéré comme

inacceptable, pour l'attente à l'arrêt d'une part et le temps total à l'arrivée d'autre part. La répartition des réponses est présentée dans la Figure 3.8 et la Figure 3.9.

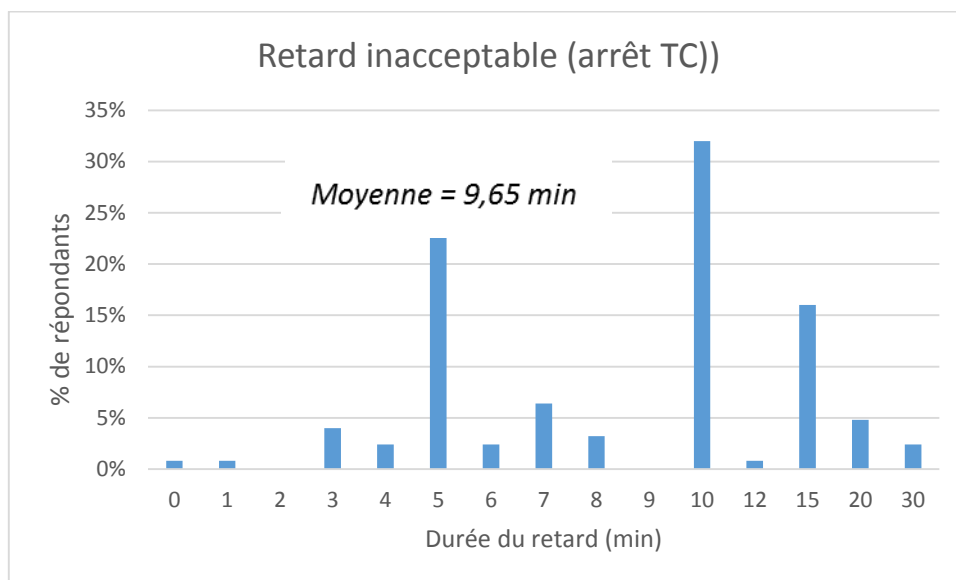


Figure 3.8 Répartition des seuils de retard inacceptable à l'arrêt de TC (N=125)

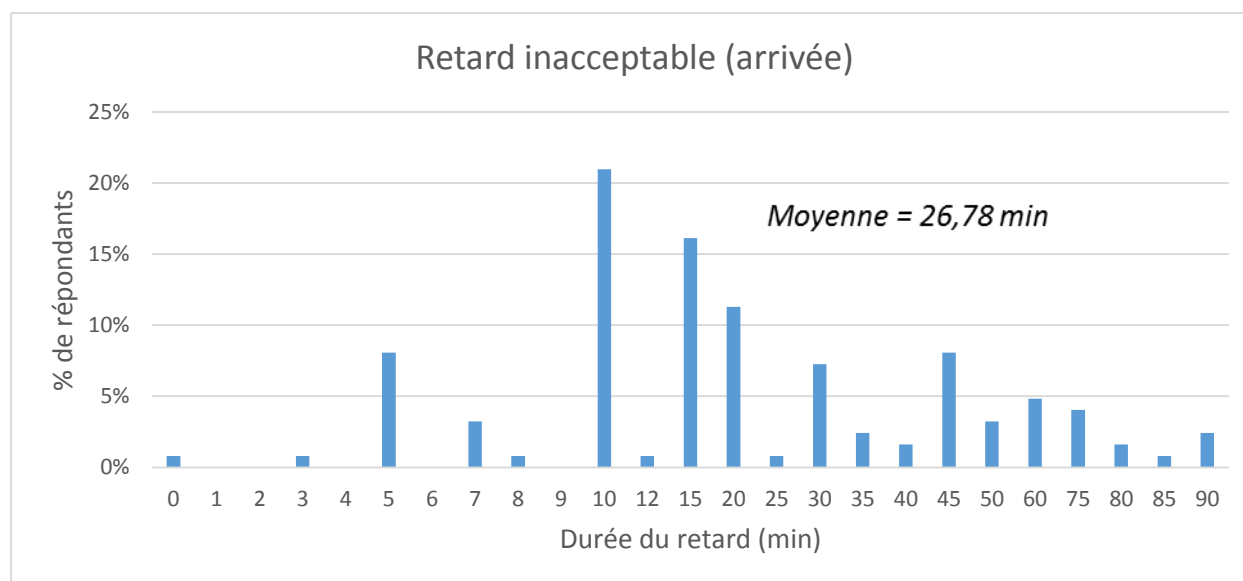


Figure 3.9 Répartition des seuils de retard inacceptable à l'arrivée de TC (N=125)

Ainsi, la durée du retard jugée acceptable est très différente à l'arrêt et à l'arrivée. En moyenne, le seuil de retard acceptable à l'arrêt est d'environ 10 minutes et la Figure 3.8 montre que beaucoup de personnes situent même ce seuil à 5 minutes. Pour le retard à l'arrivée, le seuil est bien plus grand puisqu'il est d'environ 27 minutes en moyenne et la Figure 3.9 montre un

nombre important de personnes le fixant à 45 minutes ou plus. Cette valeur assez élevée est éventuellement due au fait que les répondants ne pénalisent pas beaucoup une situation d'attente une fois le trajet débuté, ou encore à un manque de compréhension de la question posée.

Une autre question posée concerne le seuil de temps à partir duquel il est inacceptable de se trouver debout dans un véhicule de TC.

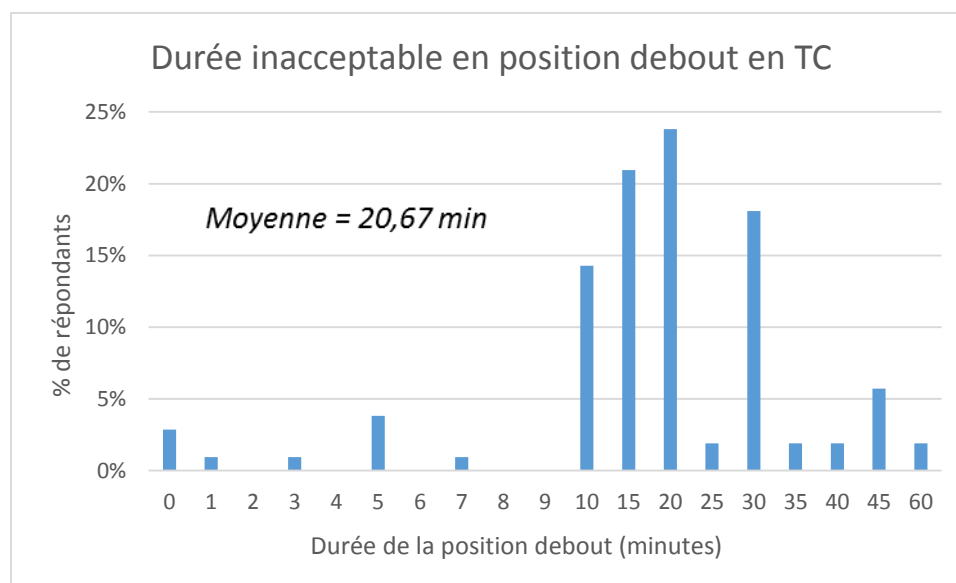


Figure 3.10 Répartition des seuils de durée inacceptable en position debout en véhicule (N=105)

Les répondants jugent alors que le seuil de durée acceptable en position debout est d'environ 20 minutes en moyenne. De plus, la répartition des réponses de la Figure 3.10 expose que la grande majorité des réponses est comprise entre 10 et 30 minutes.

Les sondés ont également dû répondre à une question liée à leur utilisation du TC. Celle-ci les interroge sur l'impact de la présence d'une correspondance, en demandant si cela peut les décourager d'utiliser le TC dans leur déplacement le plus fréquent. Les résultats sont exposés dans la Figure 3.11.

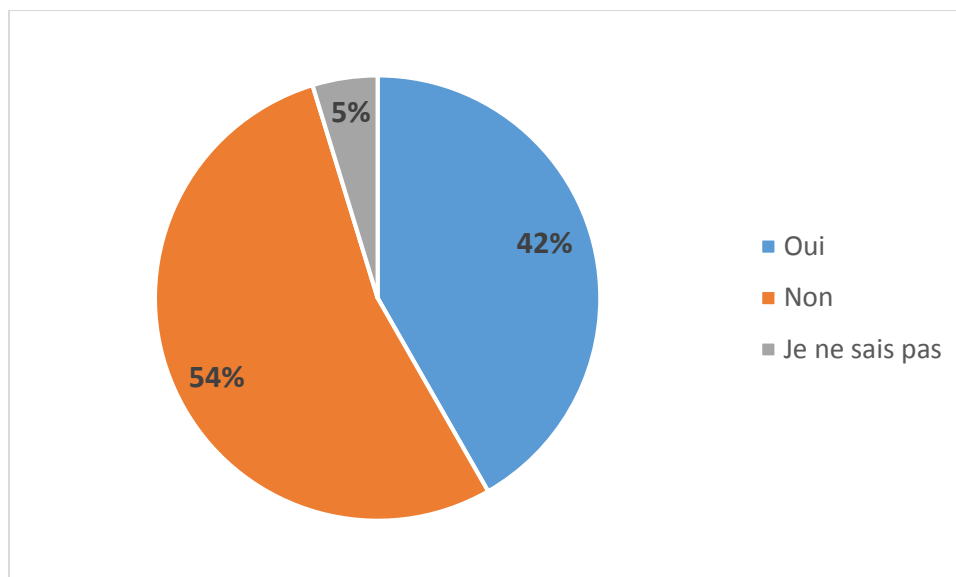


Figure 3.11 Nombre de personnes découragées de l'utilisation du TC par la présence d'une correspondance (N=127)

Ce sont donc près de la moitié des répondants qui ont affirmé que la présence d'une correspondance dans leur déplacement le plus fréquent les décourage d'utiliser le TC.

La question suivante demande d'évaluer l'importance de différents critères dans le choix du moyen de transport, sur une échelle de 1 (pas important) à 10 (très important). Les attentes sont formulées de la forme ci-contre : « Si aujourd'hui je devais choisir un ou des moyens de transport, j'opterais pour un mode de transport... ». Les résultats pour les différents profils sont présentés dans le Tableau 3.14, le Tableau 3.15, le Tableau 3.16 et le Tableau 3.17.

Tableau 3.14 Moyennes de l'évaluation des attentes pour les différents types de profil

	Utilisateurs TC (N=126)	Ouverts TC (N=206)	Fermés TC (N=70)
... qui me permet de faire ma part pour l'environnement (ex : diminuer les gaz à effet de serre)	8,12	6,70	6,51
... qui requiert peu de déplacements à pied	6,72	6,16	6,57
... qui m'offre une température ambiante qui me convient (ex : climatisation, chauffage)	7,63	7,87	7,97
... qui me permet de me déplacer au moment souhaité	9,02	9,36	9,09
... qui m'évite le stress de conduire	7,27	5,28	5,41
... qui me permet d'éviter les foules	6,90	7,15	7,37
... qui représente bien le rôle que je joue dans la société	6,22	5,35	5,59
...qui est le moyen le plus économique possible pour me déplacer	8,46	7,24	6,53
...qui m'offre le trajet le plus rapide jusqu'à ma destination	9,08	9,20	9,04

Tableau 3.15 Évaluation de l'importance de certaines attentes par les utilisateurs du TC (N=126)

	Je ne sais pas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
... qui me permet de faire ma part pour l'environnement (ex : diminuer les gaz à effet de serre)	1%	1%	0%	2%	2%	4%	6%	13%	21%	15%	35%
... qui requiert peu de déplacements à pied	1%	9%	1%	9%	4%	6%	6%	14%	20%	15%	16%
... qui m'offre une température ambiante qui me convient (ex : climatisation, chauffage)	1%	2%	1%	1%	2%	7%	10%	19%	16%	22%	20%
... qui me permet de me déplacer au moment souhaité	1%	0%	0%	0%	1%	2%	2%	6%	9%	30%	49%
... qui m'évite le stress de conduire	2%	9%	3%	1%	3%	5%	7%	9%	14%	13%	33%
... qui me permet d'éviter les foules	2%	4%	3%	5%	2%	11%	9%	11%	20%	15%	17%
... qui représente bien le rôle que je joue dans la société	6%	13%	1%	5%	5%	6%	8%	9%	13%	16%	18%
...qui est le moyen le plus économique possible pour me déplacer	2%	0%	0%	0%	0%	4%	8%	9%	19%	20%	38%
...qui m'offre le trajet le plus rapide jusqu'à ma destination	1%	0%	0%	0%	0%	2%	4%	5%	10%	26%	53%

Tableau 3.16 Évaluation de l'importance de certaines attentes par les automobilistes ouverts au TC (N=206)

	Je ne sais pas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
... qui me permet de faire ma part pour l'environnement (ex : diminuer les gaz à effet de serre)	1%	6%	1%	7%	6%	12%	6%	15%	17%	14%	16%
... qui requiert peu de déplacements à pied	0%	12%	5%	6%	7%	9%	7%	13%	16%	8%	17%
... qui m'offre une température ambiante qui me convient (ex : climatisation, chauffage)	0%	2%	1%	2%	1%	7%	5%	18%	19%	15%	29%
... qui me permet de me déplacer au moment souhaité	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	1%	15%	15%	67%
... qui m'évite le stress de conduire	0%	24%	4%	7%	5%	11%	5%	9%	14%	8%	12%
... qui me permet d'éviter les foules	0%	6%	3%	6%	2%	8%	6%	16%	12%	16%	25%
... qui représente bien le rôle que je joue dans la société	4%	18%	4%	6%	7%	11%	7%	9%	13%	10%	11%
...qui est le moyen le plus économique possible pour me déplacer	0%	5%	2%	4%	3%	9%	5%	15%	19%	13%	24%
...qui m'offre le trajet le plus rapide jusqu'à ma destination	0%	1%	0%	0%	0%	0%	2%	3%	12%	21%	60%

Tableau 3.17 Évaluation de l'importance de certaines attentes par les automobilistes fermés au TC (N=70)

	Je ne sais pas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
... qui me permet de faire ma part pour l'environnement (ex : diminuer les gaz à effet de serre)	3%	6%	0%	4%	7%	13%	9%	16%	21%	7%	14%
... qui requiert peu de déplacements à pied	0%	10%	4%	4%	3%	10%	10%	13%	14%	14%	17%
... qui m'offre une température ambiante qui me convient (ex : climatisation, chauffage)	0%	3%	1%	0%	0%	6%	4%	14%	31%	14%	26%
... qui me permet de me déplacer au moment souhaité	0%	3%	0%	0%	0%	0%	3%	3%	11%	23%	57%
... qui m'évite le stress de conduire	3%	17%	1%	6%	6%	19%	13%	6%	7%	14%	9%
... qui me permet d'éviter les foules	0%	9%	1%	4%	3%	6%	6%	9%	17%	16%	30%
... qui représente bien le rôle que je joue dans la société	4%	13%	3%	6%	4%	11%	11%	17%	17%	6%	7%
...qui est le moyen le plus économique possible pour me déplacer	1%	6%	1%	9%	3%	11%	10%	17%	14%	16%	11%
...qui m'offre le trajet le plus rapide jusqu'à ma destination	0%	1%	0%	0%	0%	1%	3%	6%	13%	21%	54%

Pour tous les types de profil, les deux critères qui recueillent les meilleurs scores dans le choix du mode est le départ au moment souhaité et la rapidité du trajet. De plus, les scores pour la part dans l'environnement, l'évitement du stress de conduire et l'économie du trajet sont plus élevés pour le TC que pour les automobilistes. C'est le contraire pour le critère d'évitement des foules. La répartition des scores du Tableau 3.15, du Tableau 3.16 et du Tableau 3.17 amènent aux mêmes conclusions.

Les répondants devaient ensuite évaluer leur intérêt pour différentes améliorations apportées au service de TC. Les résultats pour les différents profils sont présentés dans le Tableau 3.18, le Tableau 3.19 et le Tableau 3.20.

Tableau 3.18 Intérêts des utilisateurs du TC pour différentes améliorations du service (N=127)

	Je ne sais pas	Pas du tout intéressé	Peu intéressé	Assez intéressé	Très intéressé
...l'intégration d'un Wi-Fi dans les autobus	2%	13%	28%	26%	31%
...le suivi des départs en temps réels sur un téléphone intelligent	2%	10%	26%	32%	29%
...l'installation de plus d'abribus	1%	6%	22%	40%	31%
...l'installation de plus de bancs aux arrêts d'autobus	2%	8%	29%	37%	24%
...moderniser l'apparence des abribus	1%	20%	44%	22%	13%
...l'instauration d'un réseau d'autobus de nuit	5%	15%	42%	18%	20%
...l'ajout de places assises dans les autobus	2%	0%	14%	44%	40%
...plus d'espace pour les poussettes et les fauteuils roulants à bord des autobus	6%	16%	37%	33%	8%
...l'ajout de supports à vélo sur les autobus	5%	20%	32%	29%	13%
...l'installation de panneaux d'affichage électroniques dans les autobus	2%	14%	31%	28%	24%
...la climatisation à l'intérieur des autobus	2%	4%	20%	34%	40%

Tableau 3.19 Intérêts des automobilistes ouverts au TC pour différentes améliorations du service (N=206)

	Je ne sais pas	Pas du tout intéressé	Peu intéressé	Assez intéressé	Très intéressé
...l'intégration d'un Wi-Fi dans les autobus	3%	14%	25%	25%	32%
...le suivi des départs en temps réels sur un téléphone intelligent	2%	17%	25%	28%	27%
...l'installation de plus d'abribus	2%	6%	29%	36%	27%
...l'installation de plus de bancs aux arrêts d'autobus	1%	6%	37%	36%	20%
...moderniser l'apparence des abribus	3%	14%	44%	26%	12%
...l'instauration d'un réseau d'autobus de nuit	5%	16%	45%	17%	16%
...l'ajout de places assises dans les autobus	3%	2%	23%	42%	30%
...plus d'espace pour les poussettes et les fauteuils roulants à bord des autobus	7%	11%	27%	37%	18%
...l'ajout de supports à vélo sur les autobus	4%	20%	37%	25%	13%
...l'installation de panneaux d'affichage électroniques dans les autobus	5%	13%	39%	29%	13%
...la climatisation à l'intérieur des autobus	2%	2%	17%	42%	37%

Tableau 3.20 Intérêts des automobilistes fermés au TC pour différentes améliorations du service (N=70)

	Je ne sais pas	Pas du tout intéressé	Peu intéressé	Assez intéressé	Très intéressé
...l'intégration d'un Wi-Fi dans les autobus	1%	19%	34%	16%	30%
...le suivi des départs en temps réels sur un téléphone intelligent	3%	19%	31%	27%	20%
...l'installation de plus d'abribus	7%	11%	26%	44%	11%
...l'installation de plus de bancs aux arrêts d'autobus	4%	17%	27%	41%	10%
...moderniser l'apparence des abribus	4%	21%	40%	27%	7%
...l'instauration d'un réseau d'autobus de nuit	7%	24%	37%	24%	7%
...l'ajout de places assises dans les autobus	3%	10%	17%	51%	19%
...plus d'espace pour les poussettes et les fauteuils roulants à bord des autobus	4%	16%	33%	34%	13%
...l'ajout de supports à vélo sur les autobus	4%	21%	24%	34%	16%
...l'installation de panneaux d'affichage électroniques dans les autobus	6%	24%	30%	31%	9%
...la climatisation à l'intérieur des autobus	6%	7%	17%	36%	34%

Pour les différents types de profil, les appréciations des améliorations du service de TC sont assez similaires. En effet, l'ajout de places assises et la climatisation dans les autobus intéressent une très forte majorité des personnes sondées. À l'inverse, la modernisation de l'apparence des abribus ne semble pas être d'un grand intérêt pour les répondants.

Les sondés sont ensuite interrogés sur le fait de rallonger la durée de leur déplacement le plus fréquent si le TC répondait à leurs besoins. S'ils acceptent, il est ensuite demandé de chiffrer la durée maximale qu'ils seraient prêts à ajouter. Les résultats sont présentés dans la Figure 3.12 et la Figure 3.13.

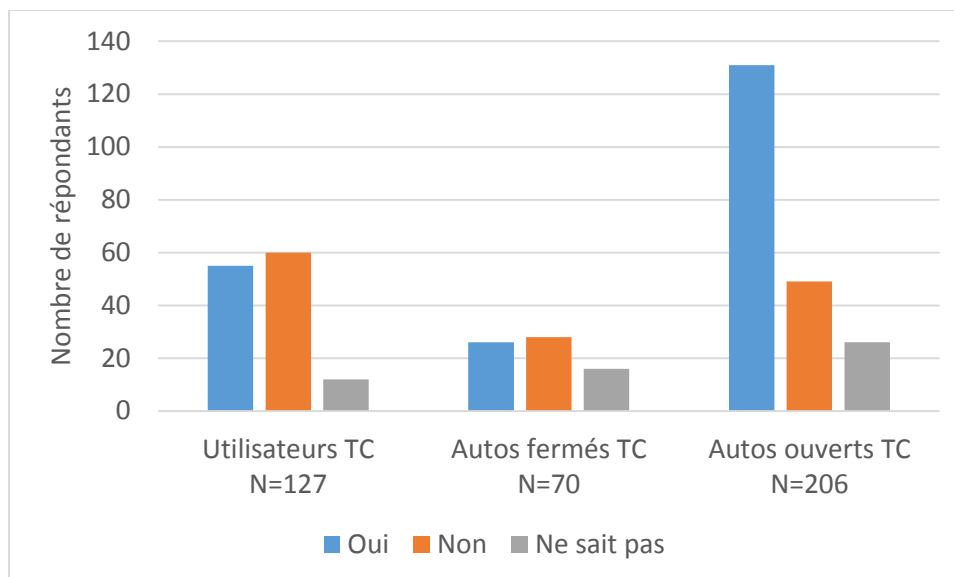


Figure 3.12 Nombre de répondants acceptant ou non de rallonger leur durée de déplacement

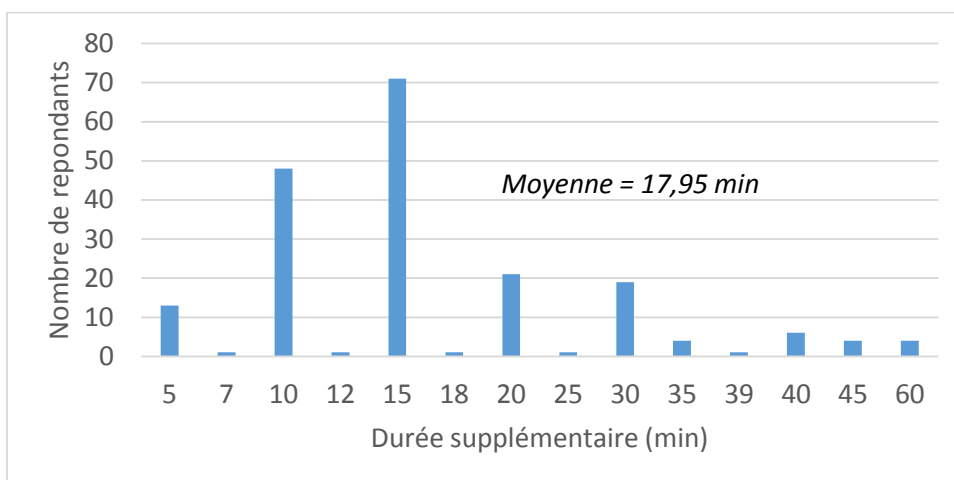


Figure 3.13 Distribution des durées supplémentaire accordées parmi les répondants (N=195)

Si les utilisateurs du TC et les automobilistes fermés au TC sont partagés quant à une augmentation de leur durée de déplacement, ils sont en revanche une grande majorité à l'accepter chez les automobilistes ouverts au TC. Au niveau de la durée maximale consentie, elle est en moyenne d'environ 18 minutes, certains tolérant d'ajouter 30 minutes et plus (Figure 3.134).

Par la suite, les sondés sont mis dans l'hypothèse de l'utilisation du TC. Ils devaient alors statuer entre deux options pour deux cas : 1) Marcher plus pour arriver à l'arrêt de bus mais avec une

plus grande fréquence ou inversement 2) Prendre un plus long trajet sans correspondance ou un plus court avec une correspondance. Les résultats sont présentés ci-dessous dans la Figure 3.14.

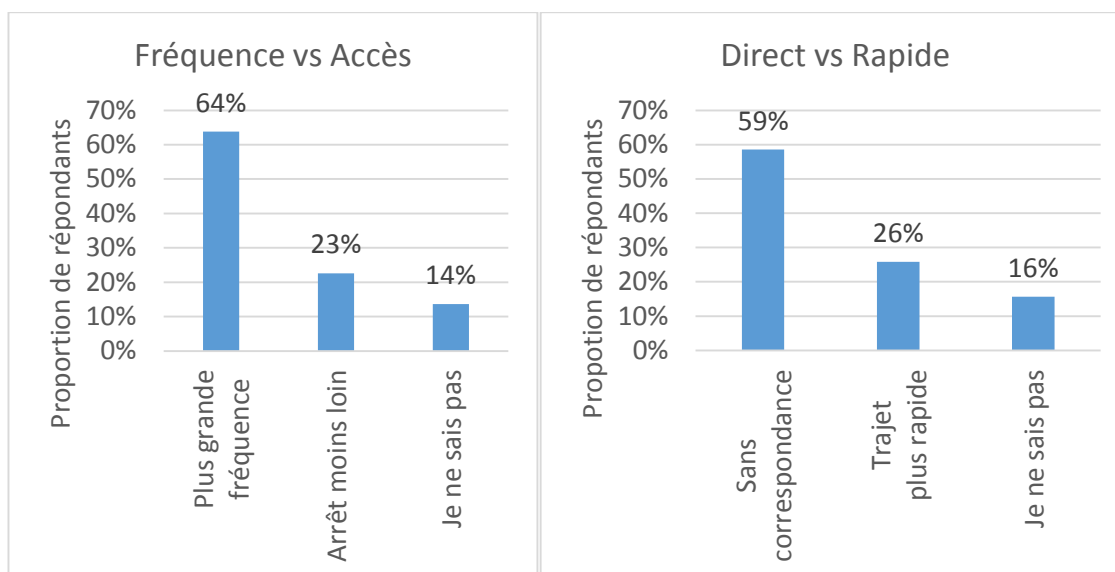


Figure 3.14 Choix des répondants dans deux cas (N=403)

La fréquence apparaît clairement comme étant un aspect plus important pour les personnes sondées; elles préfèrent ainsi marcher qu'attendre leur bus. De plus, les correspondances sont évitées par les répondants; même avec un temps de trajet plus court, devoir changer de ligne semble être perçu très négativement.

3.5 Synthèse du chapitre 3

En mettant en perspective les résultats des trois sondages menés par les agences de transport (AMT, STM et RTL), il est intéressant de constater leurs similitudes. En effet, la flexibilité/fréquence est la première catégorie de recommandation émise par les utilisateurs du train de l'AMT. Pour les utilisateurs du métro ou du bus de la STM, les deux attentes principales qui ressortent sont également la fiabilité/ponctualité et la fréquence. Ces deux thèmes se retrouvent également en tête des préoccupations des Longueuillois dans leur choix de mode, qu'ils empruntent ou non habituellement le TC. Ce dernier sondage permet d'explorer également les attentes de différents types d'utilisateurs (TC ou auto) vis-à-vis de leur mode de transport, de

quantifier certains aspects ou encore de juger de l'importance relative de certains éléments du TC.

Il est également pertinent de constater que les trois sondages préliminaires présentés au début de chapitre recueillent des réponses très comparables aux trois sondages des agences. Ainsi, la fiabilité et la fréquence y apparaissent encore une fois comme les deux aspects majeurs à considérer. Les personnes interrogées réclament donc en priorité que le service soit assuré de manière efficace, en évitant les retards et avec des passages réguliers. Posséder diverses alternatives de qualité pour réaliser leur trajet peut ainsi permettre de répondre à leurs attentes. Cela appuie le fait de développer une méthodologie pour estimer la diversité et la qualité des alternatives de TC.

CHAPITRE 4 MÉTHODOLOGIE

Le présent chapitre introduit la méthodologie développée menant aux indicateurs de diversité et de qualité des alternatives de TC. Elle permet de présenter le cadre méthodologique, et précise les différentes étapes permettant de calculer ces deux indicateurs. Enfin, afin d'illustrer la méthode, un exemple de son application est détaillé.

4.1 Avant-propos

Avant d'introduire la méthodologie en soi, il est nécessaire d'apporter quelques précisions quant à son cadre. C'est l'objet de cette section, qui introduit aussi brièvement les étapes méthodologiques avant d'y revenir plus en détail dans la section suivante.

4.1.1 Contexte de la méthode

L'évaluation des alternatives de déplacement pour une paire OD dépend en réalité de plusieurs facteurs, concernant à fois les caractéristiques du trajet et celles de la personne. Celles-ci sont présentées dans la Figure 4.1.

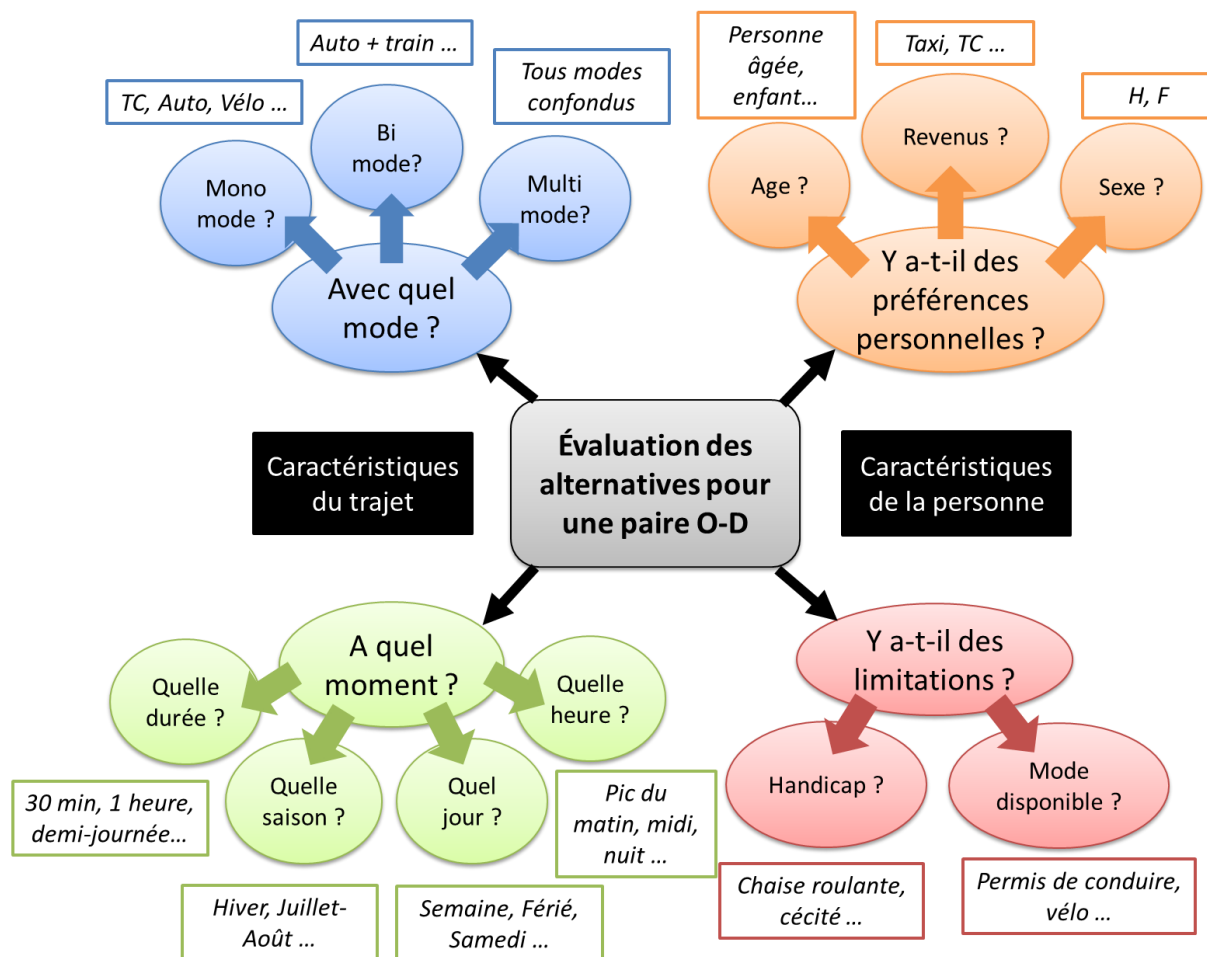


Figure 4.1 Schéma des facteurs à considérer dans l'évaluation des alternatives pour une paire OD

Le premier facteur à prendre en compte est le mode considéré pour assurer le déplacement. Il peut être unique, double lorsque l'on considère par exemple l'automobile pour se rendre à l'arrêt de TC ou même multiple lorsque l'ensemble des modes offerts par le cocktail transport est pris en compte (auto partage, vélo libre-service, taxi etc.). Dans le cadre de la méthode présentée dans ce mémoire et comme précisé précédemment, seul le TC est considéré dans les modes de transport sachant que le cadre conceptuel pourra être étendu pour couvrir l'ensemble des modes. Les alternatives ne contiendront que des lignes de TC et la marche pour se rendre à l'arrêt et arriver à destination.

Le moment du déplacement influence lui aussi les alternatives disponibles pour la paire OD. En effet, il est d'abord nécessaire de fixer la durée du créneau horaire durant lequel les alternatives

sont souhaitées. La saison de l'année, le type de jour et l'heure de la journée jouent également un rôle prépondérant puisque le service de TC dépend de ces paramètres.

Les caractéristiques de la personne qui effectue le trajet doivent aussi être considérées. Celle-ci peut avoir des limitations physiques qui l'empêchent d'emprunter certains types de service, ou peut ne pas avoir un accès à un mode pour une raison particulière (transport d'un colis par exemple). Enfin, les caractéristiques sociodémographiques de l'individu peuvent avoir un impact sur les alternatives qu'il choisit. Les perceptions des différents temps durant le trajet peuvent également varier selon ces caractéristiques. Dans la méthode présentée, il est en général considéré que la personne ne possède aucune limitation ou caractéristiques spécifiques réduisant le nombre ou le type d'alternatives disponibles.

4.1.2 Structure globale de la méthode

La méthodologie menant au calcul des deux indicateurs de diversité et de qualité est détaillée sur la figure ci-dessous. Comme précisé précédemment, elle concerne l'évaluation des alternatives de TC disponibles pour une paire OD.

La méthode commence par la définition d'une demande de trajet en TC, définie par une origine, une destination ainsi qu'un créneau horaire. À partir de celle-ci, un calculateur de chemin permet de générer un ensemble de choix de trajets disponibles pour répondre à la demande. Ensuite, des indicateurs sont produits pour chacun de ces chemins trouvés, concernant diverses catégories (temps, coût, correspondance, directitude, performance, indépendance). Une étape de filtrage vient alors s'ajouter afin de sélectionner seulement les alternatives les plus pertinentes. Différentes pondérations sont ensuite appliquées à ces indicateurs afin d'obtenir un score pour chaque alternative, suivant lequel elles peuvent être classées. Pour finir, les indicateurs de qualité et de diversité globaux sont calculés, en tenant compte de ce classement, mais aussi de la qualité et de l'indépendance précédemment définies pour chacune.

Les différentes étapes de la méthode, à savoir la génération de l'ensemble des choix, l'évaluation individuelle et les indicateurs, le filtrage, le classement et les calculs des indicateurs de qualité et de diversité sont détaillées par la suite. Un exemple de test de la méthode est ensuite présenté pour illustrer les concepts précédemment définis.


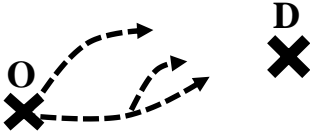
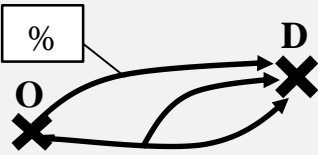

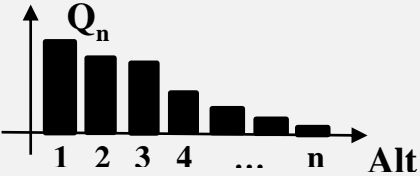
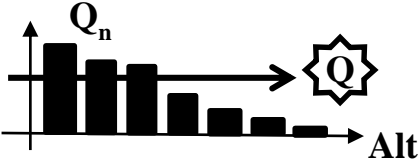
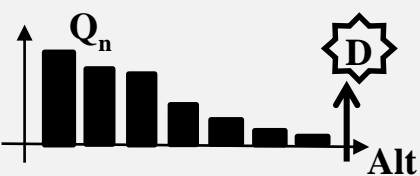
<u>Étape</u>	<u>Illustration</u>	<u>Description</u>
Demande de trajet en transport en commun		<i>Origine Destination Créneau horaire</i>
Génération de l'ensemble des choix		<i>Calculateur de trajet en transport en commun</i>
Évaluation individuelle des alternatives		<i>Production d'indicateurs pour chaque alternative</i>
Filtrage		<i>Critères d'indépendance et de pertinence</i>
Classement des alternatives		<i>Évalué grâce à une somme pondérée d'indicateurs</i>
Calcul de l'indicateur global de qualité		<i>Qualité moyenne des alternatives Pondéré par le classement</i>
Calcul de l'indicateur global de diversité		<i>Nombre d'alternatives Pondéré par l'indépendance</i>

Figure 4.2 Cadre général de la méthodologie

4.2 Étapes méthodologiques

Cette section vise à préciser le déroulement des étapes de la méthode précédemment introduite. Elle détaille les différents paramètres menant au calcul des deux indicateurs de diversité et de qualité.

4.2.1 Génération de l'ensemble des choix

La définition de la demande de transport, à savoir une origine, une destination et un créneau horaire, est suffisante pour générer l'ensemble des choix de trajets possibles. Cette étape nécessite néanmoins l'utilisation d'un calculateur de chemin TC. Celui-ci peut utiliser des algorithmes différents pour trouver les alternatives disponibles reliant l'origine à la destination, en prenant généralement en compte les caractéristiques du service de TC mais aussi les similarités entre les différents chemins trouvés. De plus, des seuils sont insérés dans les algorithmes afin de limiter le nombre d'alternatives trouvées, qui serait sinon quasi illimité.

Pour plus d'informations concernant cette étape, voir la revue de littérature présente dans la partie 2.3.2 Calcul des routes disponibles.

4.2.2 Évaluation individuelle

Une fois que les différentes alternatives de TC sont générées par le calculateur, il est nécessaire de les évaluer individuellement. Pour cela, une série d'indicateurs est défini pour chacune d'entre elles. Ces indicateurs sont les suivants :

- Temps d'accès à la marche T_{acc}
- Temps d'attente T_{att}
- Temps en véhicule $T_{véh}$
- Temps de marche en correspondance T_{marc}
- Temps d'attente en correspondance T_{attc}
- Temps de sortie à la marche T_{sor}
- Coût monétaire du trajet C
- Nombre de correspondances N_c
- Coût de correspondance C_c

- Coût angulaire C_{ang}
- Hauteur maximum H_{max}
- Capacité horaire C_{ph}
- Distance entre les arrêts $Stop_{km}$
- Niveau d'indépendance in

La description de ces indicateurs est précisée dans les sections suivantes.

4.2.2.1 Indicateurs de temps

Comme précisé dans la section 4.1.1 Contexte de la méthode, le seul mode de transport inclus dans les alternatives est le TC. Cependant, les temps d'accès et de sortie sont des temps à la marche, vers et depuis un arrêt de transport en commun. Ils ne peuvent pas inclure d'autres modes tels que l'automobile ou le taxi. L'inclusion d'autres modes d'accès que la marche afin de considérer des déplacements bimodaux serait envisageable mais ne rentre pas dans le contexte du projet.

De plus, le temps d'attente n'est ici pas seulement considéré comme la moitié de l'intervalle comme il est souvent fait l'hypothèse. Cela signifierait alors une arrivée uniforme des passagers aux arrêts de TC. Ainsi, pour des intervalles assez grands, les passagers n'arrivent plus de façon aléatoire mais planifient leur arrivée suivant l'horaire. La section 2.5.4 Le temps d'attente et la fréquence de la ligne apportent plus de détails sur le sujet et la littérature correspondante. Une progression logarithmique est donc ici utilisée pour estimer le temps d'attente, en utilisant l'équation ci-dessous.

$$T_{att} = \begin{cases} \frac{intervalle}{2}, & intervalle \leq 5min \\ \frac{1,5}{(\ln 10 - \ln 5)} * \ln intervalle + 2,5 - \frac{1,5}{(\ln 10 - \ln 5)} \ln 5, & intervalle > 5min \end{cases}$$

La figure ci-dessous est la représentation graphique de cette évolution, pour un intervalle de service variant entre 0 et 30 minutes. Si pour les intervalles inférieurs à 5 minutes le temps d'attente estimé suit la progression de la moitié de l'intervalle, il s'en éloigne pour des intervalles plus grands. Ainsi, pour un intervalle de service de 10 minutes par exemple, le temps d'attente

estimé est de 4 minutes contre 5 en prenant la moitié de l'intervalle. Pour un intervalle de 25 minutes, il est d'environ 6 minutes contre 12,5 minutes en considérant la moitié de l'intervalle.

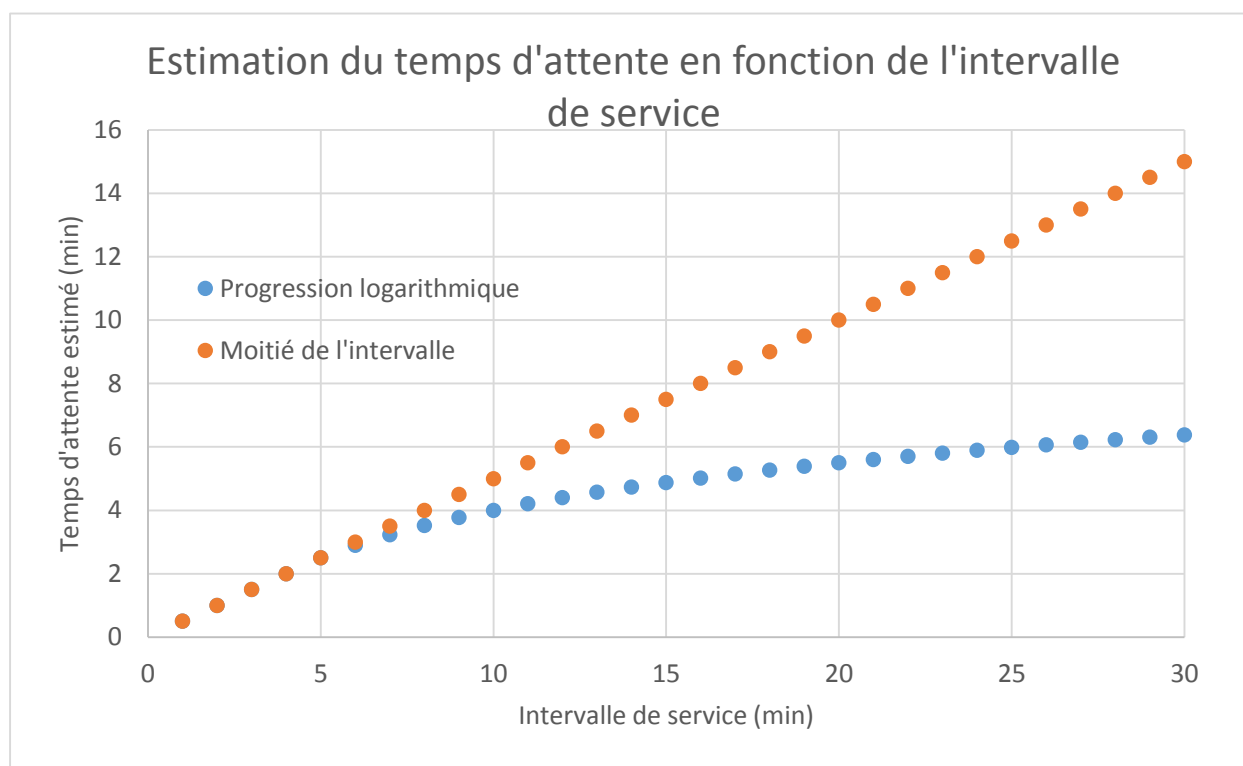


Figure 4.3 Comparaison entre le temps d'attente estimé par l'équation et la moitié de l'intervalle

De même, le temps d'attente en correspondance n'est pas ici estimé par la moitié de l'intervalle de la ligne en aval. Cette hypothèse considère que les passagers arrivent encore une selon une distribution uniforme à l'arrêt. D'une part, si l'intervalle de service est assez petit, cette hypothèse peut encore être considérée. D'autre part, si l'intervalle est assez grand, les lignes peuvent être synchronisées entre elles. Si c'est le cas et que le service est régulier, ce temps d'attente est alors beaucoup plus court que la moitié de l'intervalle de service, et ne dépend même plus de celui-ci. Si le service est irrégulier et que la correspondance est manquée, le temps d'attente peut alors être beaucoup plus grand. Pour prendre en compte cet aspect, une progression logarithmique est également considérée pour les intervalles de plus de 15 minutes, suivant l'équation ci-dessous.

$$T_{attc} = \begin{cases} \frac{intervalle}{2}, & intervalle \leq 15min \\ \frac{1,5}{(\ln 10 - \ln 5)} * \ln intervalle + 7,5 - \frac{1,5}{(\ln 10 - \ln 5)} \ln 15, & intervalle > 15 min \end{cases}$$

Le temps d'attente en correspondance total pour l'alternative considérée est alors la somme de T_{attc} pour toutes les lignes.

Pour calculer T_{marc} (temps de marche en correspondance), plusieurs cas de figures se présentent. Si la correspondance se produit entre deux lignes de bus, T_{marc} est le temps mis à la marche entre les deux arrêts suivant une géométrie plane. Si la correspondance inclut un arrêt de bus et un arrêt souterrain (métro par exemple), deux situations se présentent. Si les données de temps de marche réel pour accéder à la station souterraine depuis ou vers l'arrêt de bus sont disponibles, elles sont considérées. Dans le cas contraire, T_{marc} est estimé par le temps mis pour marcher entre les deux arrêts en géométrie plane. Enfin, pour une correspondance impliquant deux arrêts souterrains, les données de temps mis à la marche quai à quai ne sont souvent pas disponibles. Une approximation doit être alors effectuée pour estimer ce temps.

Le dernier indicateur de temps est enfin T_{veh} (temps en véhicule), calculé comme la somme des temps en véhicule de toutes les lignes de l'alternative. Ce temps est la différence entre l'heure d'arrivée au dernier arrêt de la ligne et l'heure de montée au premier arrêt de la ligne.

4.2.2.2 Indicateur de coût

Le coût monétaire d'un trajet en TC est généralement fixe pour un passager. Cependant, il peut varier selon les caractéristiques du voyageur (étudiant, senior etc.), car les sociétés de transport peuvent alors proposer des tarifs préférentiels. De plus, le forfait choisi (10 voyages, 3 jours, etc.) peut permettre de réduire le coût du trajet. Enfin, les réseaux de TC proposent parfois des tarifs variant suivant la zone dans laquelle le trajet s'effectue, ou encore suivant le mode emprunté (train, métro, bus etc.). Le coût monétaire du trajet est donc une variable importante d'évaluation d'une alternative de TC. À noter que si le passager possède un titre de transport lui permettant d'avoir des trajets en illimité sur le réseau, alors son coût est ici considéré comme étant de 0.

4.2.2.3 Indicateurs de correspondances

Comme il a été mentionné précédemment, les correspondances peuvent représenter un irritant majeur dans un trajet en TC. Le nombre de correspondances n'est cependant pas le seul indicateur à être pris en compte. La section de revue de littérature 2.5.3 Les pénalités de correspondance nous renseigne sur le rôle primordial que joue la fréquence de la ligne dans la perception de la correspondance, car elle détermine les conséquences subies en cas de transfert manqué. Le type de mode des deux lignes impliquées dans la correspondance est aussi important d'après cette revue de littérature. Ainsi, en plus de considérer le nombre de correspondances dans l'évaluation d'un trajet, un coût supplémentaire qui dépend de la fréquence et des modes est introduit pour chaque changement de ligne, défini par :

$$Cc = 1 - \exp(\beta c * (intervallec - 1)^2)$$

Où :

- *intervallec* est l'intervalle de la ligne en aval impliquée dans la correspondance;
- βc est un coefficient qui dépend du type de mode impliqué dans la correspondance:
 - $\frac{\ln(0,8)}{81}$ pour une correspondance impliquant deux lignes de bus;
 - $\frac{\ln(0,85)}{81}$ pour une correspondance impliquant une ligne de bus et un mode sur rail (tramway, métro, train);
 - $\frac{\ln(0,9)}{81}$ pour une correspondance impliquant deux modes sur rail.

Si l'alternative comporte plusieurs correspondances, Cc est la somme de tous les coûts de correspondances. La représentation graphique de ce coût de correspondance en fonction de l'intervalle de la ligne aval est représentée pour les 3 types de configuration de mode sur la figure 4.4. La fonction de coût est ainsi formulée de façon à ce que le coût additionnel imposé à chaque correspondance soit compris entre 0 (pour les « meilleures » correspondances) et 1 (pour les plus « pénibles »). Le coût augmente logiquement avec l'augmentation de l'intervalle de service. Il est également plus important lorsque la correspondance comprend 2 lignes de bus et

plus faible lorsque deux modes sur rails sont impliqués. Enfin, la fonction est calibrée pour que le coût pour un intervalle de ligne avale de 10 minutes soit de :

- 0,2 pour une correspondance entre deux lignes de bus;
- 0,15 pour une correspondance entre une ligne de bus et un mode sur rail;
- 0,1 pour une correspondance entre deux modes sur rail.

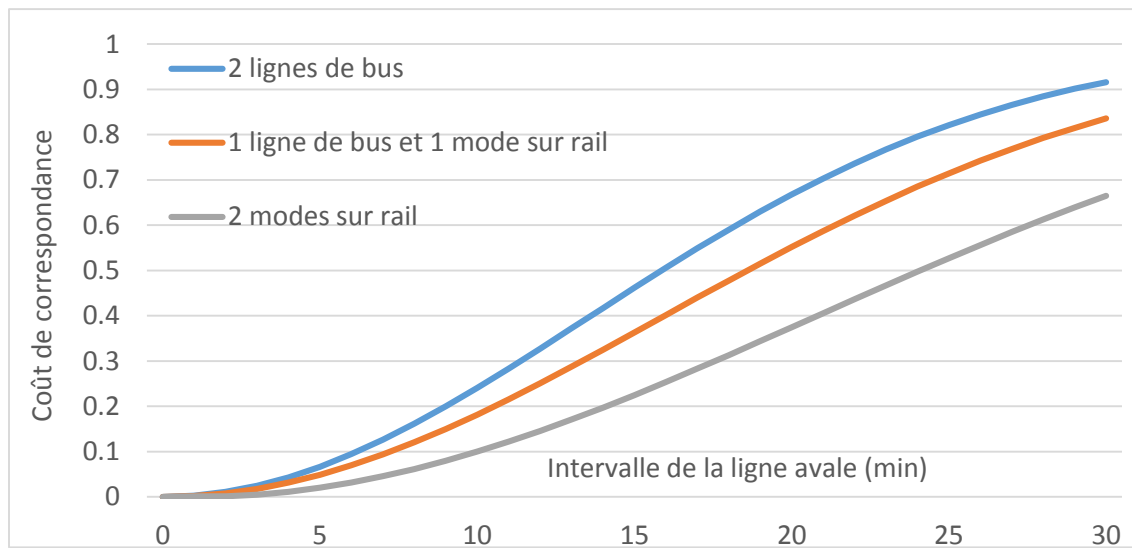


Figure 4.4 Coûts de correspondance suivant l'intervalle de ligne avale pour les 3 types de configuration de mode

4.2.2.4 Indicateurs de directitude

La notion de directitude du trajet s'intéresse à la distorsion du chemin en regard de la ligne de désir (ligne directe entre l'origine et la destination), reprenant ainsi l'idée de Raveau et al. (2014). En effet, ces derniers ont introduit certaines variables pour considérer le fait que le voyageur dévie de sa ligne de désir, entraînant alors un certain désagrément.

Si le trajet comprend une ou plusieurs correspondances, seul le coût angulaire est considéré comme indicateur de directitude. Ce dernier reprend la formulation de Raveau et al. (2014) :

$$C_{ang} = \sum_l dl * \sin\left(\frac{\theta_l}{2}\right)$$

Où :

- l est une ligne de TC
- dl est la distance directe entre le premier et le dernier arrêt de la ligne l
- θl est l'angle entre la ligne de désir et la direction de la prochaine correspondance

S'il n'y a pas de correspondance dans le trajet considéré, un autre indicateur est introduit pour tenir compte de la tortuosité de la ligne empruntée. Il s'agit de la hauteur maximale H_{max} , qui est la distance maximale entre la ligne de désir et la ligne de transport en commun. La figure ci-dessous illustre les deux indicateurs ainsi présentés :

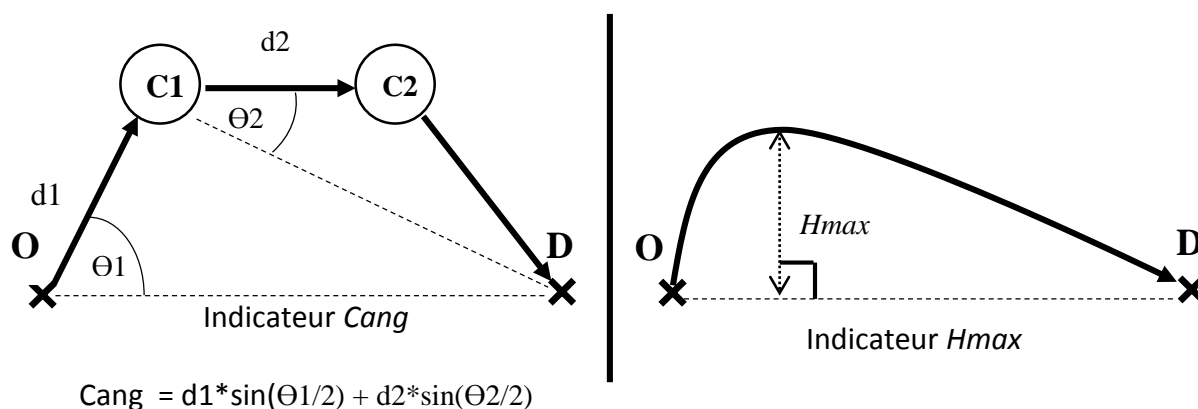


Figure 4.5 Illustrations du calcul des indicateurs *Cang* et *Hmax*

4.2.2.5 Indicateurs de performance

La performance de chaque alternative se mesure grâce à deux indicateurs. Le premier est la capacité horaire *Caph*, c'est-à-dire la capacité théorique de la ligne empruntée multipliée par sa fréquence. Elle représente le nombre de personnes que peut transporter la ligne par heure et se mesure donc en passagers/heure. Si le trajet contient plusieurs lignes, alors l'indicateur est pondéré par le temps en véhicule sur chaque ligne. Cet indicateur prend en compte à la fois la capacité offerte par le véhicule de TC emprunté, qui dépend donc du type de mode emprunté (du mode léger comme un bus à petite capacité jusqu'au mode lourd comme un train de banlieue à grosse capacité), mais aussi la fréquence de la ligne, et considère donc également l'intensité de passage des véhicules.

L'espace entre les arrêts est également un aspect important, car il peut affecter la perception d'efficacité d'une ligne. En effet, un service express qui évite certains arrêts améliore non seulement la vitesse commerciale, mais aussi la perception de performance. L'indicateur correspondant à cet aspect est alors le nombre d'arrêts par kilomètre *Stopkm*. Il est mesuré en sommant le nombre d'arrêts desservis toutes lignes confondues, divisé par la distance totale parcourue par l'ensemble des lignes de l'alternative.

4.2.2.6 Autres aspects importants mais non inclus dans la méthode proposée

D'innombrables autres aspects peuvent être étudiés pour évaluer la qualité d'un trajet en TC. Cependant, ils concernent bien souvent des aspects plus qualitatifs, qui sont par définition plus difficiles à mesurer. Cela s'explique pour différentes raisons : les données nécessaires à l'évaluation de ces aspects plus qualitatifs, comme le confort, la fiabilité ou la sécurité ne sont pas disponibles ou n'ont tout simplement pas fait l'objet d'une cueillette spécifique; la complexité du phénomène étudié et sa corrélation avec d'autres facteurs peuvent rendre son évaluation quantitative extrêmement compliquée ; enfin, par définition même, certains éléments qualitatifs réfèrent au registre de la perception de l'utilisateur dans son expérience en TC et il apparaît alors très difficile de pouvoir placer un indicateur quantitatif sur ce jugement individuel. Cette section apporte un aperçu de la façon dont ce problème peut être traité.

Comme il a déjà été fait mention précédemment dans le Chapitre 3, la fiabilité est un critère de grande importance pour les passagers. Si à première vue ce concept est assez aisément mesurable, il dépend cependant de la perception individuelle d'un retard en TC. Le TCQSM propose une méthode pour évaluer ce facteur en catégorisant les données du retard enregistrées précédemment pour définir un niveau de fiabilité sur une ligne (Kittelsohn & Associates Inc. & al., 2013). D'autres études récentes tentent de se rapprocher de la perception individuelle de retard en collectant des données GPS ou cartes à puce. C'est le cas de Wood et al. (2015), qui développent une méthode afin d'estimer le « buffer time » des passagers. Ce dernier représente le temps supplémentaire qu'un utilisateur du TC planifie afin de limiter les conséquences d'un possible retard. Leur méthode a l'avantage de fournir une estimation du « buffer time » par paire OD, ce qui paraît être un bon indicateur de fiabilité pour évaluer une alternative de TC.

Le confort est également un aspect qualitatif de grande importance à évaluer. Parmi ses différentes composantes, le confort à bord du véhicule lié au niveau d'achalandage apparaît comme primordial. En effet, comme mentionné dans la section 2.5.7 L'achalandage et le confort à bord, le nombre de personnes présentes dans un véhicule influence à la fois la probabilité d'avoir une place assise mais aussi la perception globale de confort à bord. Si les données du nombre de personnes présentes en véhicule entre chaque arrêt sont disponibles, le problème se simplifie. Cela pourrait par exemple être le cas dans un bus avec un système de cartes à puce validées à la montée et à la descente, couplé aux données GPS du véhicule. Van Oort et al. (2015) proposent ainsi une fonction d'achalandage qui dépend à la fois de la capacité totale du véhicule et de la capacité en nombre de sièges. Leur fonction prend alors comme donnée d'entrée le facteur de charge du véhicule et fournit un nombre variant de 0 (personne à bord) à 2 (véhicule plein), en passant par la valeur 1 qui indique que tous les sièges sont occupés. Ce facteur peut ainsi être défini entre chaque arrêt et donner un indicateur de l'achalandage à bord du véhicule pour une certaine alternative de TC.

D'autres aspects du confort du voyageur peuvent être traités à d'autres moments qu'en véhicule. Ainsi, la qualité de l'accès vers l'arrêt de TC est un critère important. En plus de mesurer la distance plane comme c'est le cas classiquement, le cheminement entier considérant aussi les éventuelles ascensions ou descentes vers le service de TC doit être pris en compte. Le confort à l'attente du véhicule de TC est aussi important et peut être déterminée notamment par les équipements présents. Cela inclut les bancs, les abris, les éclairages, mais aussi le niveau d'information sur le service. Ce dernier s'échelonne de la simple présence des horaires à l'arrêt jusqu'aux afficheurs dynamiques offrant l'arrivée du prochain véhicule en temps réel. Comme détaillé dans la section 2.5.6 L'information en temps réel, ce type d'information peut réduire le temps d'attente perçu par l'utilisateur. De plus, le nombre et le type de correspondance (fréquence et modes) ne suffisent pas à entièrement à définir la qualité de changement de ligne. Celle-ci passe également par le type de cheminement qu'un passager doit effectuer lors de sa correspondance. Cela peut aussi bien inclure une longue distance de marche avec changement de niveau qu'un simple transfert quai à quai. Pour finir, des indicateurs relevant du niveau de sécurité ou encore de propreté pourraient raffiner l'évaluation de la qualité d'une alternative de TC.

4.2.2.7 Indicateur d'indépendance

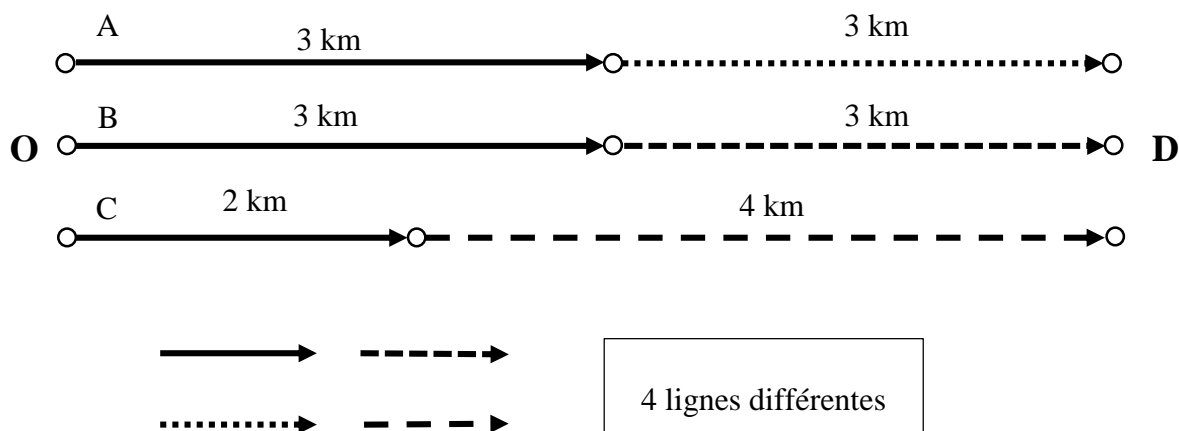
Le calculateur de trajets peut fournir des alternatives de TC qui ont certains segments de leurs lignes en commun. Il est donc nécessaire de déterminer leur niveau d'indépendance. Pour cela, un indicateur est calculé pour chaque alternative selon la formule suivante :

$$in = \frac{1}{dn} * \sum_s ds * \frac{1}{ns}$$

Où :

- in est le niveau d'indépendance de l'alternative n ;
- dn est la distance total parcourue par les lignes de TC de l'alternative n ;
- s est un segment de ligne de TC emprunté par l'alternative n ;
- ds est la longueur du segment s ;
- ns est le nombre total d'alternatives partageant le segment s .

Cette formulation reprend l'idée de Ben Akiva et du Path Size expliquée dans la section 2.3.2. Calcul des routes disponibles. Elle est en réalité une moyenne pondérée de l'inverse du nombre d'alternatives partageant le même segment de TC. Ainsi, plus une alternative partage de lignes avec d'autres alternatives déjà présentes dans l'ensemble des choix, plus son niveau d'indépendance chute. La figure ci-dessous détaille le calcul de l'indicateur d'indépendance pour trois alternatives :



$$iA = \frac{1}{2 + 2} * \left(\frac{2}{2} + \frac{1}{2} + \frac{3}{1} \right) = 69,4\%$$

$$iB = \frac{1}{3 + 3} * \left(\frac{2}{3} + \frac{1}{2} + \frac{3}{1} \right) = 69,4\%$$

$$iC = \frac{1}{2 + 4} * \left(\frac{2}{3} + \frac{4}{1} \right) = 77,8\%$$

Figure 4.6 Exemple de calcul de i_n pour trois alternatives A, B et C joignant l'origine O à la destination D

4.2.3 Filtrage

Selon l'algorithme utilisé pour générer les différentes alternatives, le calculateur de chemins peut trouver un très grand nombre de trajets en TC pour assurer le déplacement voulu. De plus, ces trajets ne sont pas forcément tous pertinents, ni indépendants les uns des autres. Il est donc nécessaire de procéder à une étape de filtrage afin de sélectionner seulement les alternatives les plus pertinentes. Différentes contraintes doivent donc être fixées et les suivantes sont appliquées dans la méthode :

- tous les chemins doivent contenir des lignes de bus simples (non express) parcourant au minimum 2 arrêts : il est ainsi supposé que le nombre de passagers n'empruntant une ligne de bus que pour un seul arrêt est très faible;

- aucune alternative ne doit inclure plus de 3 correspondances, cela correspond à l'utilisation de 4 lignes de TC différentes, qui est le maximum supposé dans la méthode;
- les temps d'accès et de sortie ne doivent pas dépasser 23 minutes chacun;
- le temps de correspondance maximum est de 30 minutes;
- le temps de trajet ne doit pas dépasser 2 fois le temps du meilleur trajet; cela permet de ne considérer seulement les alternatives qui ont une probabilité suffisante d'être sélectionnées par les usagers;
- le niveau d'indépendance d'une alternative doit être d'au moins 33%, cela correspond à une alternative qui partagerait tous ses segments de lignes de TC avec 2 autres alternatives déjà sélectionnées.

4.2.4 Classement des alternatives

Ainsi, toutes les alternatives de TC générées et filtrées pour assurer le déplacement entre l'origine et la destination possèdent une série d'indicateurs. Cependant, ces derniers ont tous des mesures et des unités différentes (par exemple *Tacc* est un temps, *Hmax* est une longueur, *Caph* est en passagers/heure etc.). D'une part, il est nécessaire de placer un référentiel pour pouvoir situer le niveau de performance de l'indicateur. D'autre part, placer ainsi une référence permet de fournir un score en pourcentage, qui permet de comparer et de manipuler les différentes mesures des alternatives entre elles. Pour cela, une valeur référence est fixée pour chacun des indicateurs et une fonction de comparaison permet de formuler un score en pourcentage pour chacune des catégories d'indicateurs (temps, coût, correspondance, directitude et performance). La Figure 4.7 ci-dessous résume la méthode employée afin de déterminer le score d'une alternative à partir de ses indicateurs.

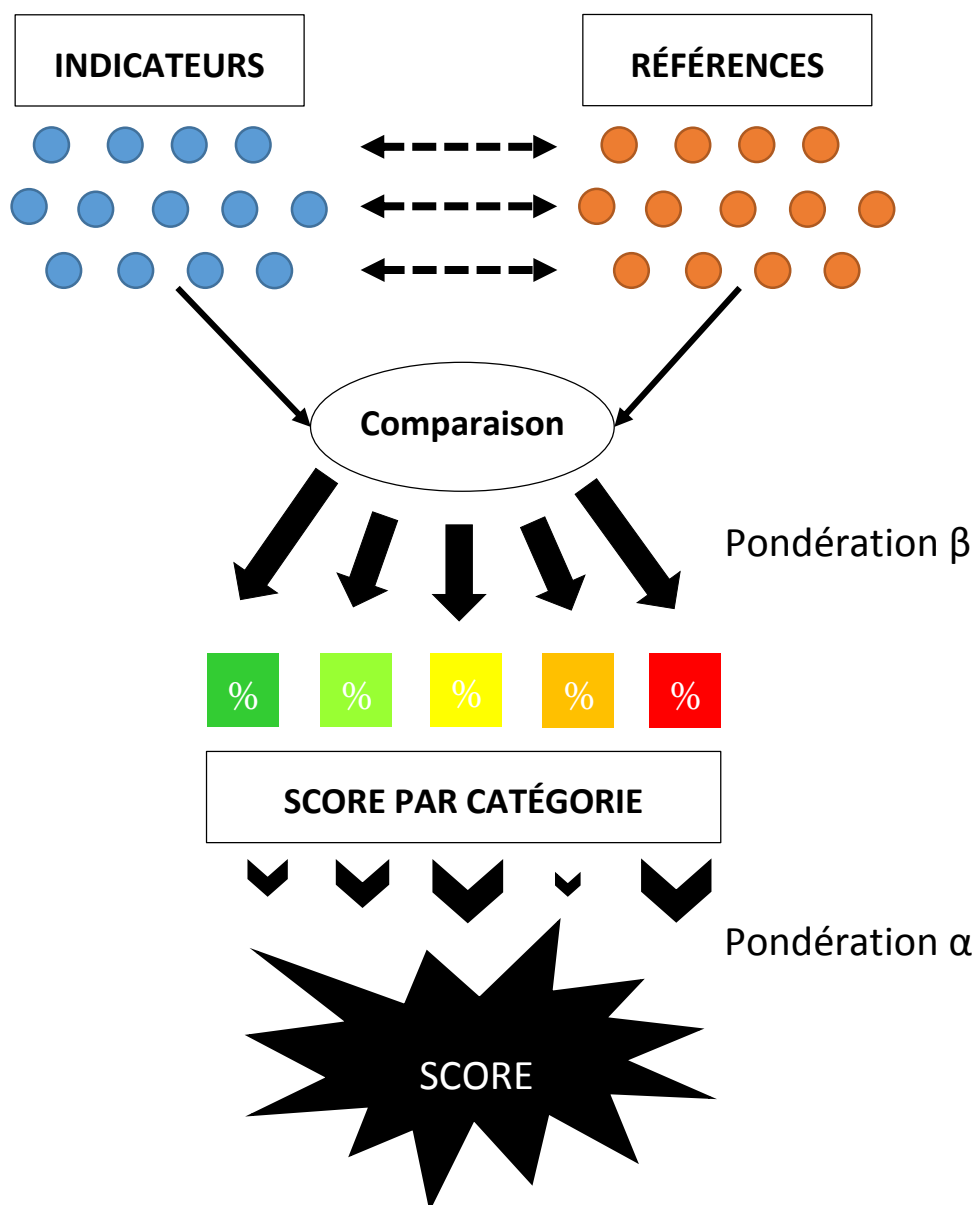


Figure 4.7 Schéma de la méthode employée pour arriver au score de chaque alternative

4.2.4.1 Référentiels des indicateurs

Le tableau ci-dessous présente les différentes références fixées pour les indicateurs présentés dans la section 4.2.2 Évaluation individuelle. Ils représentent en quelque sorte la situation idéale vers laquelle les indicateurs peuvent tendre. Certaines des variables ont été fixées arbitrairement, elles pourraient donc éventuellement être modifiées. En effet, la méthode vise surtout à permettre la comparaison des alternatives entre elles.

Tableau 4.1 Références pour chaque indicateur (abréviations définies en 4.2.2 Évaluation individuelle; Dae = distance définie plus bas)

Catégories	Temps						Coût
Indicateurs	Tacc	Tatt	Tvéh	Tmarc	Tattc	Tsor	C
Références	2	1.5	Dae*60/35	0	0	2	0
	Correspondances		Directitude		Performance		
	Nc	Cc	Cang	Hmax	Caph	Stopkm	
	0	0	0	0	45000	0,33	

Dans la catégorie du temps, les références pour les indicateurs du temps d'accès et de sortie sont de 2 minutes, représentant ainsi une très grande proximité du service de TC de l'origine et de la destination du déplacement. Pour le temps d'attente, elle est de 1.5 minutes, correspondant à un intervalle de service de 3 minutes. Les temps de marche et d'attente en correspondance ont une référence à 0 minute, car il est possible que l'alternative ne contienne aucun changement de ligne. Enfin, le temps en véhicule a pour référence le temps hypothétique mis par un métro (vitesse commerciale supposée de 35 km/h) pour parcourir la distance entre le premier et le dernier arrêt (Dae en km).

Le référentiel pour le coût est de 0, car l'individu peut posséder un abonnement de transport en commun lui permettant un nombre illimité de trajets sur le réseau de TC. Le nombre et le coût de correspondance ont pour référence 0, car une alternative peut ne pas inclure de changement de ligne. Pour la directitude, les références du coût angulaire et de la hauteur maximale sont de 0, ce qui serait le cas pour un trajet parfaitement direct suivant la ligne de désir. Enfin, pour la performance, la capacité horaire a pour référence 45000 personnes/heures, ce qui correspond à un

véhicule de capacité de 1500 personnes circulant toutes les 2 minutes. La référence de l'arrêt-km est de 0,33, soit un arrêt tous les 3 kilomètres.

4.2.4.2 Score par catégorie

Une fois les références fixées, il est alors possible de définir un score pour chacune des catégories. Pour cela, des coefficients nommés betas servent à pondérer localement les indicateurs dans les catégories qui en contiennent plusieurs. De plus, une fonction de comparaison permet de comparer les indicateurs à leur référence en fournissant un score en pourcentage pour chaque catégorie. Le tableau suivant présente les pondérations betas et les fonctions de comparaison :

Tableau 4.2 Coefficients de pondération et fonctions de comparaison des indicateurs (Na = Non applicable)

Catégories	Temps						Coût
Indicateurs	Tacc	Tatt	Tvéh	Tmarc	Tattc	Tsor	C
Pondération	β_{tacc}	β_{tatt}	$\beta_{tvéh}$	β_{tmarc}	β_{tattc}	β_{tsor}	β_c
Fonction de comparaison	$\exp(\ln 0,5 * (\frac{\sum Ti * \beta_{ti} - \sum T_{ref} * \beta_{ti}}{2,5 * \sum T_{ref} * \beta_{ti}})^2)$						$\exp(\frac{\ln(0,5)}{0,05} * (\frac{C}{\beta C})^2)$

Tableau 4.2 Coefficients de pondération et fonctions de comparaison des indicateurs (Na = Non applicable) (suite)

Catégories	Correspondances		Directitude		Performance	
Indicateurs	Nc	Cc	Cang	Hmax	Caph	Stopkm
Pondération	Na	Na	Na	Na	β_{caph}	β_{stopkm}
Fonction de comparaison	$\exp(\ln(0,5)) * \left(\frac{Nc + Cc}{1,5}\right)^2$		$\exp(\ln(0,5)) * \left(\frac{Cang^2}{5}\right)$	$\exp(\ln 0,5 * Hmax^2)$	$\begin{aligned} &\beta_{caph} * \exp(\ln(0,5)) * \left(\frac{Caph - 45000}{0,5 * 45000}\right)^2 \\ &+ \beta_{stopkm} \exp(\ln(0,5)) * \left(\frac{Stopkm - 0,33}{2 * 0,33}\right)^2 \end{aligned}$	

Les coefficients betas ne sont pas introduits pour les catégories Coût et Directitude, car la première ne contient qu'un seul indicateur et la seconde n'en utilise qu'un seul suivant le type d'alternative (avec ou sans correspondance).

La fonction de comparaison pour la catégorie Temps est une fonction gaussienne, qui évolue donc entre 0 et 1, fournissant un score entre 0 et 100%. Elle prend comme attribut une « fonction d'utilité », grâce aux différents indicateurs de temps et leur coefficient beta, qu'elle compare à une « fonction d'utilité de référence ». Elle est calibrée afin de produire un score de 0,5 (ou 50%) lorsque la « fonction d'utilité » de l'alternative est 3,5 fois plus grande que celle de référence.

Pour le coût, la fonction de comparaison est également une gaussienne. Elle prend comme argument le rapport entre le coût monétaire du déplacement et la valeur du temps de l'individu. Ce dernier, noté β_C , est le coût horaire de la personne effectuant le déplacement. En effet, suivant le motif de son déplacement, la valeur qu'elle accorde à son temps est variable, et donc le coût du

transport a plus ou moins d'impact sur elle. La fonction est paramétrée de façon à fournir un score de 50% lorsque le carré du rapport est de 0,05.

La fonction pour les correspondances prend comme argument la somme de N_c (nombre de correspondances) et de C_c (coût de correspondance). Elle fournit un score de 50 % lorsque cette somme est égale à 1,5. La directitude (voir section 4.2.2.4 Indicateurs de directitude) a pour fonction de comparaison une gaussienne, que ce soit pour le coût angulaire (trajet avec correspondance) ou la hauteur maximale (trajet sans correspondance). Enfin, pour la performance, la capacité horaire et le nombre d'arrêt-km sont également comparés à leurs références respectives grâce à des gaussiennes.

4.2.4.3 Pondérations des catégories

Les alternatives possèdent désormais un score en pourcentage pour chacune des catégories. Pour fournir un score à chacune de ces alternatives, il est ensuite nécessaire de pondérer les catégories, suivant l'importance que l'on souhaite leur donner. Ces coefficients de pondération sont nommés α . Une moyenne pondérée fournit ensuite un score pour chacune des alternatives. Leur classement est alors possible par ordre de score ainsi trouvé.

4.2.5 Qualité globale

Pour obtenir un indicateur de qualité pour l'ensemble des alternatives, le classement précédent est réutilisé. En effet, une moyenne pondérée du score individuel est réalisée. La pondération prend en compte la position de l'alternative dans le classement. Chaque alternative a ainsi deux fois plus de poids que celle classée immédiatement en dessous, en partant systématiquement d'un poids de 1 pour l'alternative en dernière position. De la sorte, si par exemple une paire OD possède 3 alternatives, alors la première aura un poids de 4, la deuxième de 2 et la troisième de 1. Cela permet de donner beaucoup plus de poids aux alternatives qui sont les mieux classées dans la qualité globale. Si une simple moyenne était réalisée sur le score individuel de chaque alternative disponible, alors les paires OD possédant plusieurs alternatives seraient défavorisées par celles d'entre elles ayant un score faible. Les paires avec une seule alternative auraient alors quant à elle une meilleure qualité globale.

4.2.6 Diversité globale

Le calcul du score de diversité globale de l'ensemble de ces alternatives s'obtient en sommant le niveau d'indépendance de toutes les alternatives disponibles pour la paire OD. Le fait de ne pas considérer chaque alternative comme une unité mais de prendre le niveau d'indépendance permet ainsi de donner moins de poids aux alternatives qui sont plus semblables aux autres. L'indicateur de diversité global s'interprète alors comme le nombre d'alternatives disponibles pour la paire OD, rectifié par la similarité entre les lignes empruntées.

4.3 Illustration de la méthode

Afin d'illustrer la méthode présentée, un exemple d'application est effectué dans cette section sur un cas fictif. Il est ainsi supposé que le calculateur de trajet a fourni trois alternatives de TC pour répondre à la demande de transport. Leurs caractéristiques sont détaillées sur la Figure 4.8.

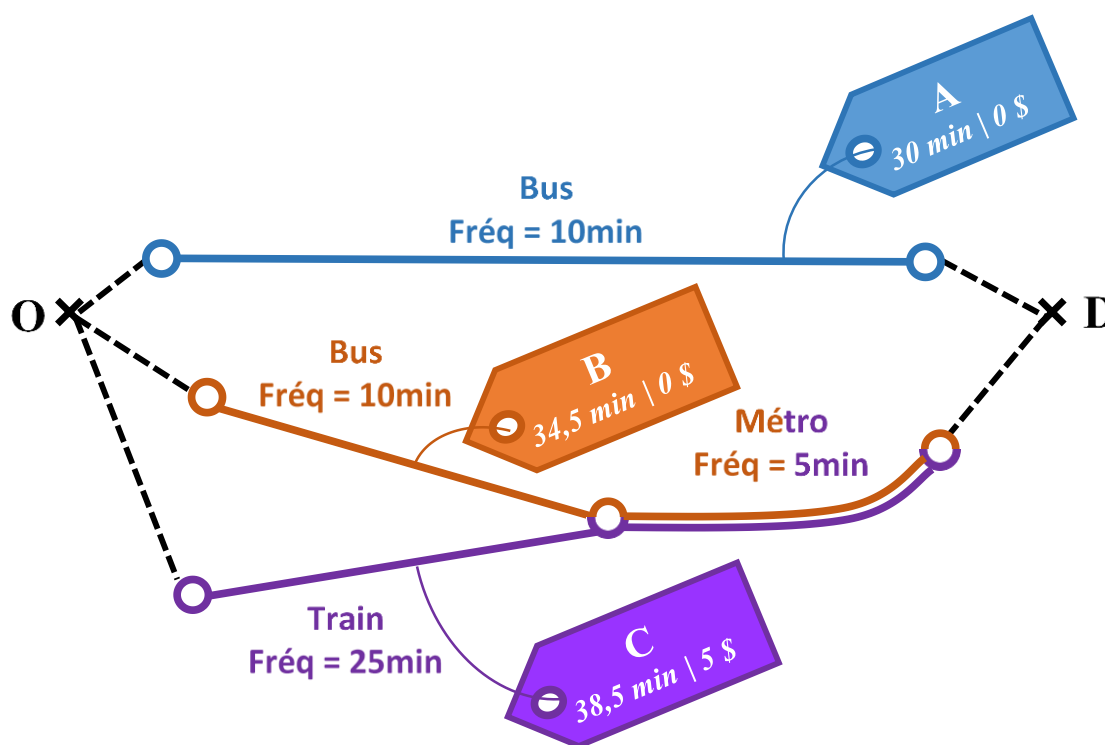


Figure 4.8 Représentations et informations des 3 alternatives de TC disponibles pour rejoindre l'origine O à la destination D

Pour chacune de ces alternatives, il est alors possible de fournir des indicateurs de temps, coût, de correspondance, de directitude et de performance. Ils sont calculés suivant les formules détaillées plus haut. Ceux-ci sont présentés dans le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** ci-dessous :

Tableau 4.3 Valeurs des différents indicateurs pour les trois alternatives A, B et C (Na = Non applicable)

		<i>Alternative A</i>	<i>Alternative B</i>	<i>Alternative C</i>
Temps	Tacc	2	5	10
	Tatt	4	4	6
	Tvéh	21	15	10
	Tmarc	0	3	5
	Tattc	0	2.5	2.5
	Tsor	3	5	5
Coût	C	0	0	5
Correspondances	Nc	0	1	1
	Cc	0	0.15	0.1

Tableau 4.3 Valeurs des différents indicateurs pour les trois alternatives A, B et C (Na = Non applicable) (suite)

		<i>Alternative A</i>	<i>Alternative B</i>	<i>Alternative C</i>
Directitude	Cang	Na	2	1.5
	Hmax	0.5	Na	Na
Performance	Caph	1000	15000	20000
	Stopkm	5	2	1.3
Indépendance	in	1	0,75	0,75

Vient ensuite l'étape de filtrage, où les alternatives sont testées pour vérifier leur respect aux différents seuils imposés :

- toutes les alternatives contiennent des lignes parcourant au minimum 2 arrêts;
- aucune alternative n'inclut plus de 3 correspondances (maximum de 1 pour B et C);
- les temps d'accès et de sortie ne dépassent pas 23 minutes chacun (maximum de 10 min pour C);
- les temps de correspondance maximum ne dépassent pas 30 minutes (maximum de 7,5 min pour C);
- les temps de trajet ne dépassent pas 2 fois le temps du meilleur trajet (A : 30 min, B : 34,5 min; C : 38,5 min);
- les niveaux d'indépendance sont d'au moins 33% (minimum de 75% pour B et C).

Toutes les contraintes sont ainsi respectées et les 3 alternatives A, B et C sont donc retenues. Pour fournir un score à chacune d'entre elles, les coefficients de pondération betas doivent d'abord être définis. Ils sont précisés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 4.4 Valeurs des coefficients de pondération betas considérées

β_{tacc}	β_{tatt}	$\beta_{tvéh}$	β_{tmarc}	β_{tattc}	β_{tsor}	β_c	β_{caph}	β_{stopkm}
2	2	1	2	2	2	20	0,5	0,5

Il est ainsi considéré que tous les temps ont deux fois plus d'importance que le temps en véhicule dans le calcul du score de temps. De plus, la valeur du temps est fixée à 20\$/h et les deux indicateurs présents dans la performance sont considérés de manière égale.

Cela permet alors de formuler un score pour chacune des catégories pour les trois alternatives. Ces scores peuvent ensuite être pondérés par les facteurs de pondération alpha, permettant de fournir un score pour les trois alternatives. Les détails sont fournis dans le tableau ci-dessous :

Tableau 4.5 Scores obtenus par catégorie pour chacune des 3 alternatives

	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	Pondération alpha
Temps	70%	55%	35%	2
Coût	100%	100%	20%	1
Correspondances	100%	55%	65%	1
Directitude	75%	50%	75%	2
Performance	30%	60%	85%	1
<i>Score total</i>	<i>74%</i>	<i>61%</i>	<i>45%</i>	<i>7</i>

Les scores totaux, obtenus en pondérant les scores pour chaque catégorie par les facteurs alphas, permettent ainsi de classer les alternatives (voir Figure 4.9). L'alternative A arrive logiquement en tête car elle est rapide, directe et à coût nul. À l'inverse, l'alternative C est dernière du classement car elle est la moins rapide et la plus chère.

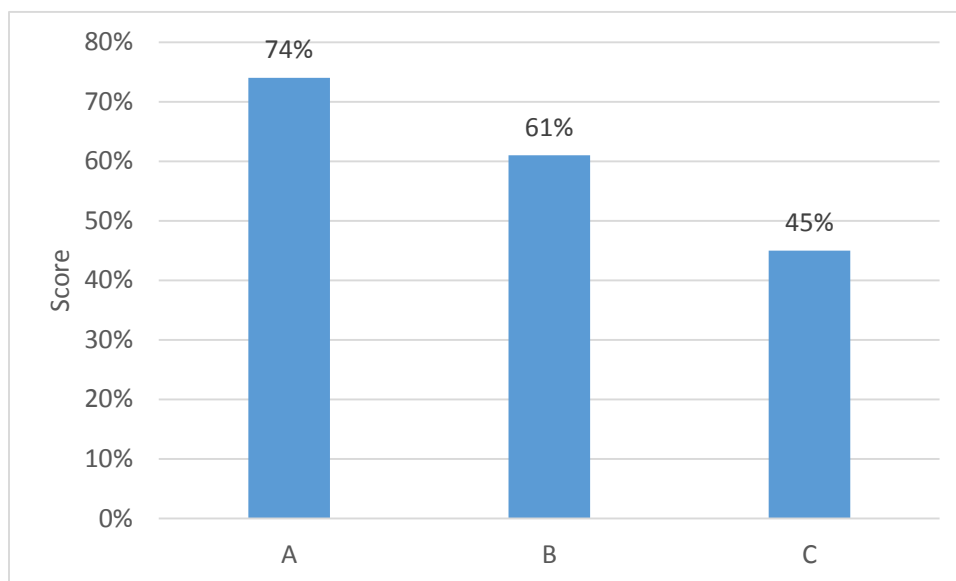


Figure 4.9 Classement des trois alternatives selon le score obtenu

Enfin, les calculs pour obtenir les deux indicateurs de qualité et de diversité sont présentés ci-dessous.

$$Q = \frac{4 * 0.74 + 2 * 0.61 + 0.45}{4 + 2 + 1} = 66\%$$

$$D = 1 + 0.75 + 0.75 = 2,5$$

Ainsi, l'indicateur de qualité globale pour la paire OD est de 66%, tandis que l'indicateur de diversité est de 2,5.

CHAPITRE 5 RÉSULTATS

Afin d'appliquer la méthodologie présentée sur différents cas concrets, différentes études de cas ont été menées. Les résultats de ces analyses sont présentés dans cette section. Une première partie considère 10 paires OD et étudie la sensibilité des coefficients de pondération alpha et beta sur l'indicateur de qualité des alternatives de TC disponibles. Une deuxième partie prend un plus grand nombre de paires OD en automatisant la méthode. Des analyses sur les indicateurs alors calculés et sur leur répartition territoriale sont établies.

5.1 Analyse de la sensibilité aux coefficients de pondération

Comme introduit dans la section 4.2.4.2 Score par catégorie, le classement des alternatives nécessite la définition de coefficients de pondération. Les coefficients beta permettent de produire un score par catégorie à partir des indicateurs des alternatives, tandis que les coefficients alpha pondèrent ces catégories pour fournir un score total par alternative. Elles peuvent ensuite être classées selon ce score total, menant au calcul de l'indicateur de qualité. Afin de tester la sensibilité de ce classement et de cet indicateur aux pondérations beta et alpha, une étude de cas est menée.

5.1.1 Présentation des données

La méthode est ainsi testée sur 10 paires OD de la région de Montréal. Les origines sont représentées sur le Figure 5.1 et la destination commune à toutes les paires est Polytechnique. Cette destination a été choisie car c'est un important générateur de déplacements et son accès en TC est particulièrement connu de l'auteur. Les calculs ont été réalisés pour un jour de semaine et un départ compris entre 6h et 9h du matin. Les différentes alternatives de TC ont été obtenues en utilisant l'outil en ligne de Google Maps, en faisant varier l'heure de départ dans le créneau horaire choisi. Les chiffres à côté des origines sur la Figure 5.1 indiquent le nombre d'alternatives trouvées.

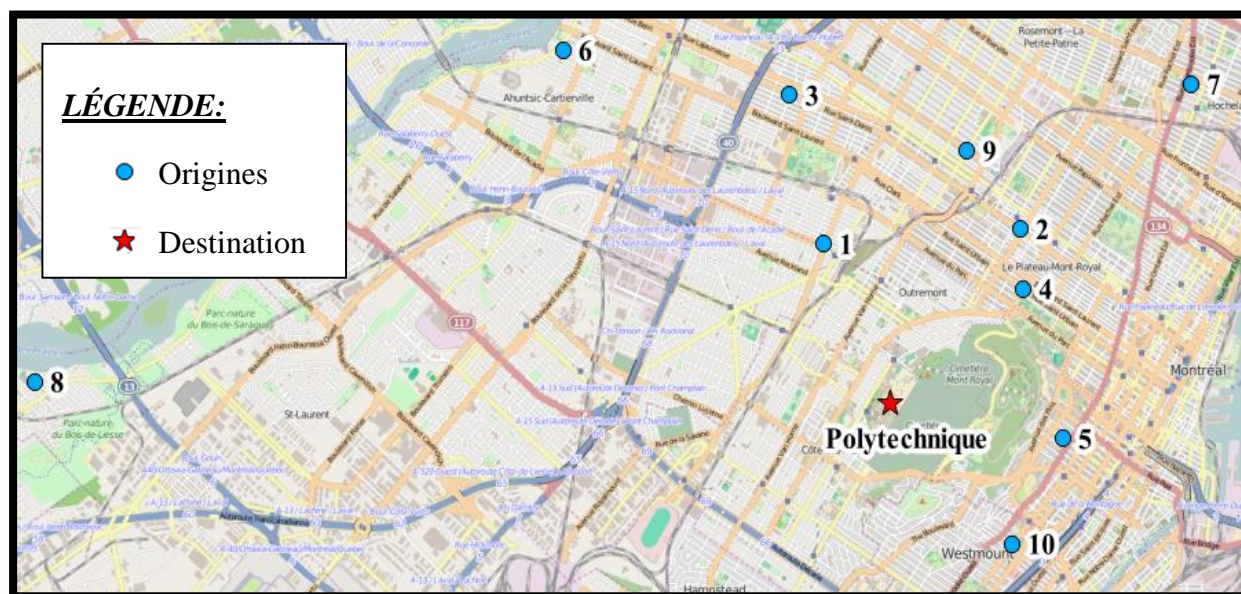


Figure 5.1 Localisation des 10 origines et de la destination des paires OD considérées

5.1.2 Déroulement de la méthode

Ce sont ainsi 55 alternatives de TC qui ont été trouvées et les indicateurs présentés en section 4.2.2 Évaluation individuelle ont été calculés. De plus, toutes les alternatives respectent les contraintes imposées dans la section 4.2.3 Filtrage.

Les différents coefficients de pondération beta et alpha ont été définis (voir Tableau 5.1) suivant 4 cas :

- un cas de référence où aucun indicateur ni catégorie n'est particulièrement mis en exergue;
- un cas a) où les catégories Correspondances et Directitude sont 10 fois plus pondérées que les autres : cela correspond par exemple à un individu qui préfère les trajets les plus directs possibles et déteste les correspondances;
- un cas b) où les catégories Coût et Performance sont 10 fois plus pondérées, les temps d'attente sont pénalisés, la capacité horaire a plus de poids et le coût horaire est de 10\$/h : cela correspond à un individu qui ne souhaite pas dépenser beaucoup d'argent pour son trajet et n'apprécie pas l'attente;

- un cas c) où la catégorie Temps est 10 fois plus pondérée, les indicateurs de temps au même niveau de pénalité que le temps en véhicule et un coût horaire de 100\$/h : cela correspond à une personne qui ne se préoccupe pas du coût monétaire de son trajet mais se focalise sur le temps total.

Tableau 5.1 Valeurs des coefficients beta et alpha pour les différents cas d'étude

	<i>Réf</i>	a)	b)	c)
β_{tacc}	2	2	2	1
β_{tatt}	2	2	4	1
$\beta_{tvéh}$	1	1	1	1
β_{tmarc}	2	2	2	1
β_{tattc}	2	2	4	1
β_{tsor}	2	2	2	1
β_c	15	15	10	100
β_{caph}	0.5	0.5	0.8	0.5
β_{stopkm}	0.5	0.5	0.2	0.5
α_{temps}	1	1	1	10
$\alpha_{coût}$	1	1	10	1
$\alpha_{correspondances}$	1	10	1	1
$\alpha_{directitude}$	1	10	1	1
$\alpha_{performance}$	1	1	10	1

À l'aide de ces coefficients, le classement des alternatives pour chaque paire OD est possible et les indicateurs de qualité et de diversité peuvent être calculés.

5.1.3 Sensibilité du classement

Une première analyse est effectuée pour considérer l'impact des facteurs de pondération sur le classement des alternatives **pour une paire OD**. Pour chacun des cas, les alternatives sont classées par ordre de score individuel, calculé selon les coefficients correspondants. L'analyse est détaillée pour la paire OD possédant 9 alternatives, mais les classements pour les autres paires sont présentés à l'Annexe A.

La représentation détaillée des 9 alternatives et de leurs lignes TC respectives est présentée à la Figure 5.2.

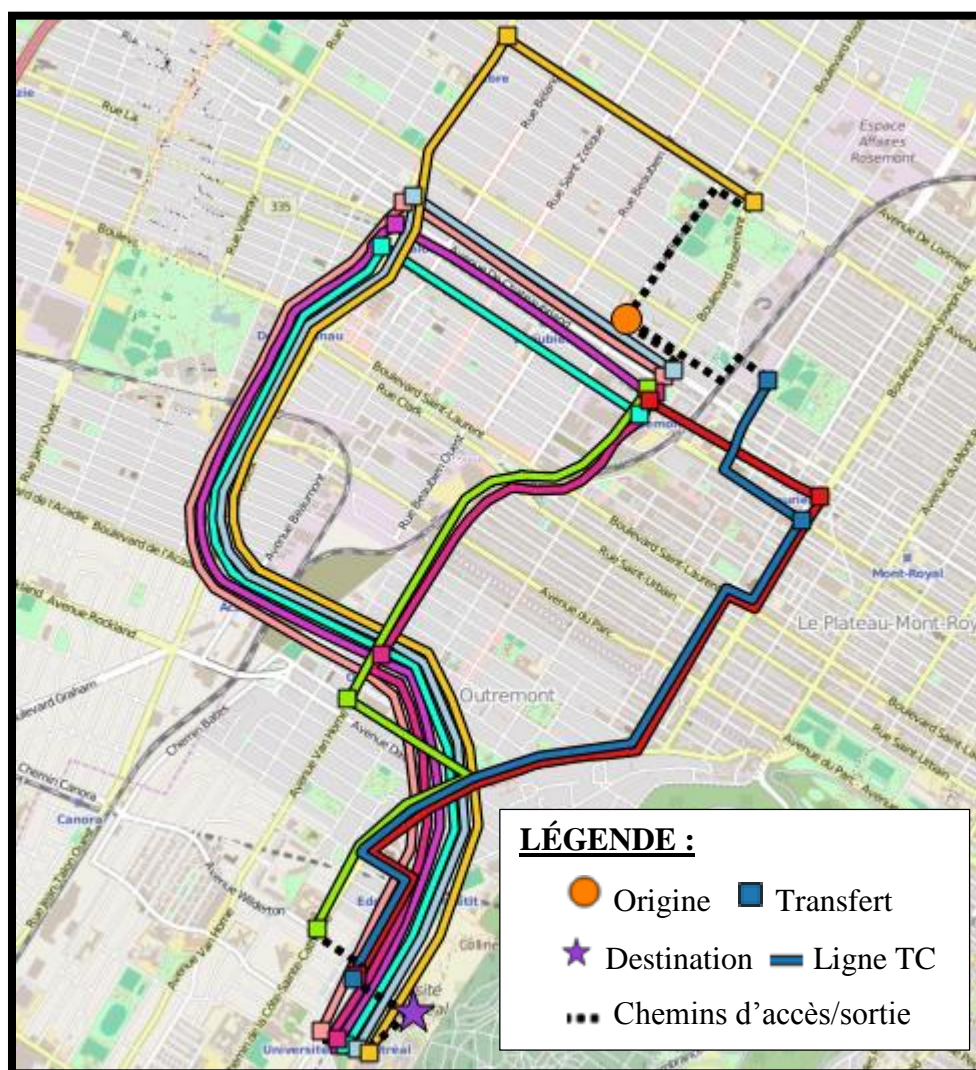


Figure 5.2 Cartographie des 9 alternatives TC pour la paire OD

Le Tableau 5.2 présente, pour les 9 alternatives, les valeurs des différents indicateurs. Les alternatives ont été nommées suivant la séquence de ligne qu'elles comportaient. Les valeurs des différents temps sont assez variables, sauf pour le temps de sortie. Cela s'explique par le fait que seuls 3 arrêts différents permettent de rejoindre Polytechnique. Ensuite, le coût est le même pour toutes les alternatives et leur nombre de correspondance est également de 1 pour toutes. Les autres indicateurs présentent des variabilités assez importantes.

Tableau 5.2 Valeurs brutes des différents indicateurs pour les 9 alternatives

	B161M5	M2M5	B809M5	M2B51	B31M5	B47B51	B161B119	B30M5	B45M5
<i>Tacc</i>	7	7	9	7	8	10	7	9	12
<i>Tatt</i>	4.00	1.25	2.00	1.25	6.38	4.00	4.00	6.38	6.38
<i>Tvéh</i>	9	9	16	18	13	16	20	14	17
<i>Tmarcc</i>	3	2	3	3	3	2	1	6	3
<i>Tattc</i>	2	2.25	2.25	4	2.25	4	6.38	2	2.25
<i>Tsor</i>	10	10	10	8	10	8	8	10	10
<i>C</i>	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25
<i>Nc</i>	1	1	1	1	1	1	1	1	1
<i>CC</i>	0.02	0.016	0.024	0.15	0.02	0.42	0.90	0.02	0.02
<i>Cang</i>	0.56	1.32	1.32	0.80	1.32	0.80	0.61	1.32	1.86
<i>Caph</i>	3313	18370	7992	2228	9277	409	330	8625	8680
<i>Stopkm</i>	1.17	0.99	0.88	3.13	1.10	3.08	2.67	1.54	1.09

Pour la paire OD en question, la répartition des scores par catégorie pour les alternatives disponibles dans la situation de référence est illustrée sur la Figure 5.3. Par souci de clarté, la catégorie Coût n'a pas été représentée car tous les scores sont égaux pour les 9 alternatives. Les scores obtenus par les alternatives pour chacune des 4 catégories sont au sommet de chaque barre.

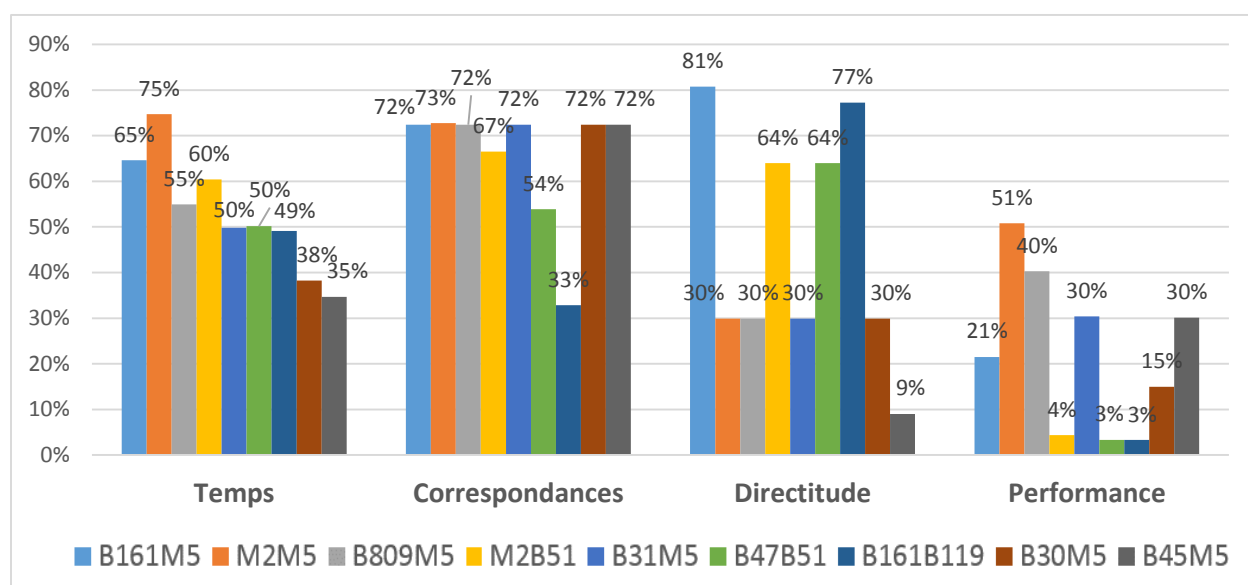


Figure 5.3 Répartition des scores par catégorie pour chacune des 9 alternatives de la paire OD

Dans la catégorie Temps, les 9 alternatives sont presque classées dans l'ordre, pour un score variant de 35% à 75%. Les scores de Correspondances sont très proches pour presque toutes les alternatives, car 6 d'entre elles comprennent une correspondance avec la ligne de métro bleue. La Directitude est de 30% pour 4 alternatives avec une correspondance au métro Jean Talon. Elle est entre 64% et 81% pour les alternatives incluant une correspondance plus près de la ligne de désir. Pour l'alternative devant correspondre à la station Fabre, la directitude est de seulement 9%. Les performances des alternatives ne sont globalement pas très bonnes. Si celles comprenant une ligne de métro sont plus élevées, celles avec des lignes de bus obtiennent des scores faibles pour la capacité horaire et l'espace entre les arrêts.

Ensuite, le classement des 9 alternatives est effectué à nouveau en utilisant les coefficients de pondération des cas a), b) et c) dans la section précédente. Les classements dans les trois cas sont illustrés sur la Figure 5.4, la Figure 5.5 et la Figure 5.6.

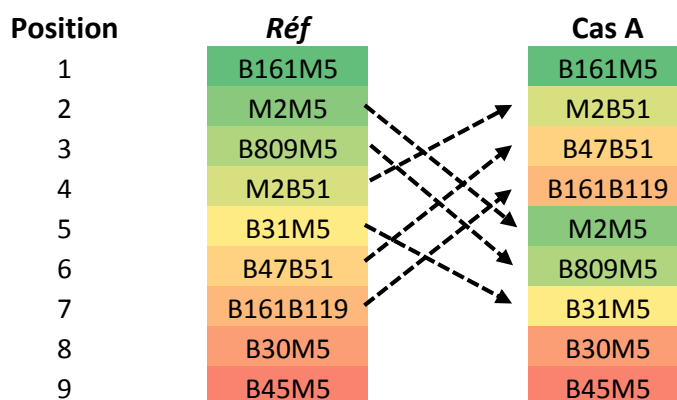


Figure 5.4 Classements des alternatives dans le cas de référence et le cas a)

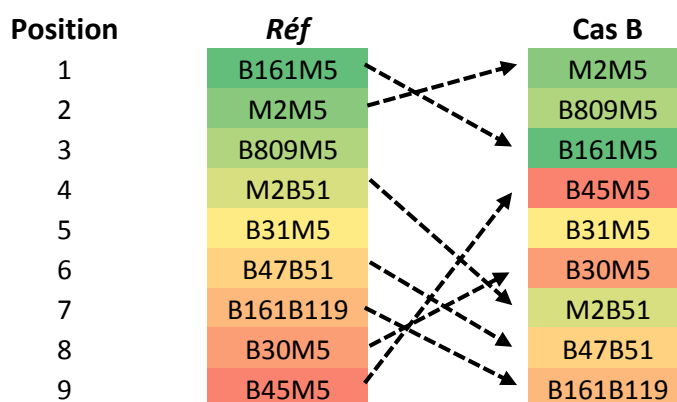


Figure 5.5 Classements des alternatives dans le cas de référence et le cas b)

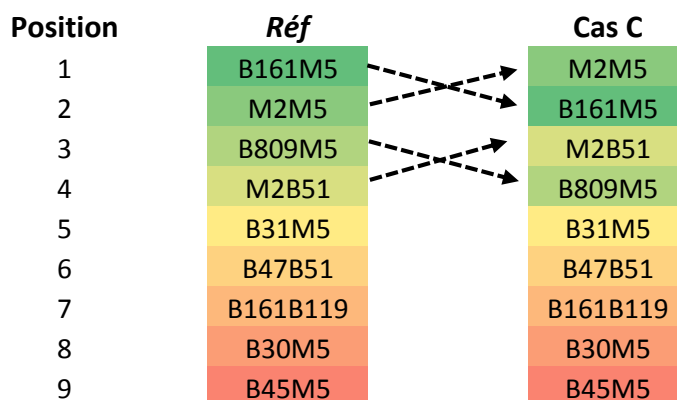


Figure 5.6 Classements des alternatives dans le cas de référence et le cas c)

Dans le cas a), ce sont au total 6 alternatives qui ont changé de 2 ou 3 positions par rapport à la situation de référence. Cela est cohérent avec le fait que le cas a) met fortement en exergue les catégories Correspondances et Directitude. Or, l'alternative B161M5 possède de très bons scores dans ces catégories (resp. 72% et 81%), car son trajet est proche de la direction de la ligne de désir et sa seule correspondance est vers un métro. Elle se trouve donc encore logiquement en tête dans le cas a) où ces deux scores sont surpondérés. Au contraire, les alternatives M2M5, B809M5 et B31M5 n'ont pas de bons scores dans ces catégories, car elles incluent toutes trois une correspondance à la station de métro Jean Talon, qui ne se trouve pas sur la direction de Polytechnique. Elles sont donc reléguées à des positions inférieures dans le cas a), et se font ainsi dépasser par les alternatives M2B51, B47B51 et B161B119. En effet, ces dernières possèdent de meilleurs scores car leur correspondance est vers une ligne de bus mais est moins éloignée de la ligne de désir.

Dans le cas b), 7 alternatives ont changé de position dans le classement, dont une de 5 places. En effet, ce cas met en avant les aspects de Coût et de Performance (*Caph* principalement), et le temps d'attente. Comme le coût de toutes les alternatives est le même, c'est donc la fréquence du service qui est principalement exposé ici. Or, l'alternative B161M5 possède une ligne de bus simple à faible fréquence et donc un score de performance inférieur à celui de M2M5 et B809M5. Elle se retrouve donc en 3^{ème} position dans le cas b). De même, les alternatives M2B51, B47B51 et B161B119 ont un très petit score de performance car principalement composées de lignes de bus, faisant ainsi chuter leur position dans le classement. Il est à noter que la remontée de 5 places dans le classement de l'alternative B45M5 est due à son bon score de performance globale, car elle est composée d'un métro sur la plus longue partie de son trajet, et d'un bus fréquent pour le reste de son parcours.

Dans le cas c), 4 alternatives changent de position : la 1^{ère} et la 2^{ème} intervertissent leur position, tout comme la 3^{ème} et la 4^{ème}. Le cas c) accentue en effet de façon très prononcée la catégorie Temps, tout en égalisant à un 1 les différentes composantes du temps de trajet. Elle attribue également un coût horaire très élevé, mais ce critère ne rentre encore une fois pas en compte comme toutes les alternatives ont le même coût monétaire. Ainsi, comme l'alternative M2M5 est plus rapide que la B161M5 et la M2B51 plus rapide que la B809M5, ces alternatives voient leur position se commuter.

Ainsi, le classement des alternatives disponibles pour une paire OD peut être très sensible aux coefficients de pondération imposés. Si les alternatives possèdent des scores variant beaucoup d'une catégorie à l'autre, alors la définition des différents coefficients de pondération peut avoir un rôle majeur dans leur classement final. L'indicateur de qualité global pour une paire OD variant avec ce classement, il est donc essentiel d'imposer des coefficients adaptés pour obtenir un indicateur final le plus pertinent possible.

5.1.4 Sensibilité de l'indicateur de qualité

Les indicateurs de diversité et de qualité pour chacune des 10 paires OD ont été calculés pour le cas de référence et les cas a), b) et c). Ils ont ensuite été reportés dans un quadrant Qualité/Diversité pour des fins d'analyse. Les résultats sont présentés dans la Figure 5.7.

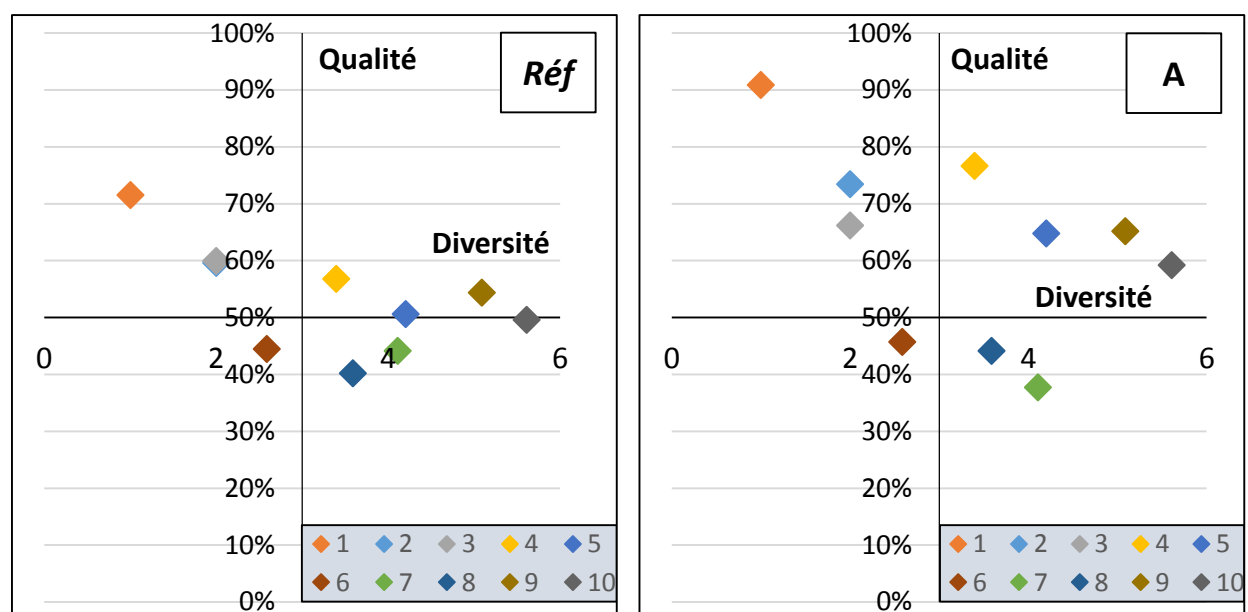


Figure 5.7 Quadrants de qualité et de diversité pour les 10 paires OD pour les différents cas

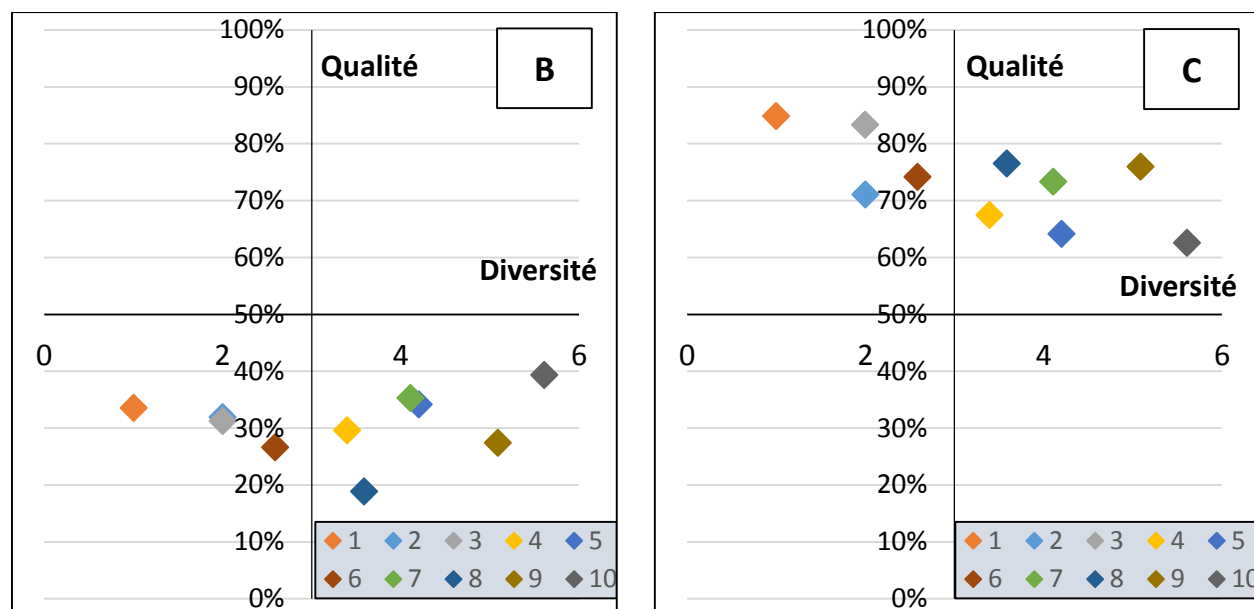


Figure 5.7 Quadrants de qualité et de diversité pour les 10 paires OD pour les différents cas
(suite)

Tout d'abord, il est intéressant de noter que l'indicateur de diversité évolue entre 0 et 6 alors que certaines paires possèdent 7 alternatives ou plus. Cela s'explique par le fait que l'indicateur ne prend pas directement le nombre d'alternatives mais somme l'indicateur d'indépendance. C'est également la raison pour laquelle des paires qui ont un nombre d'alternatives différent possèdent presque la même valeur de diversité. Cependant, comme introduit dans la section 4.2.6 Diversité globale, cet indicateur ne prend pas en compte le score individuel de chaque alternative afin d'être totalement indépendant de l'indicateur de qualité. Il n'est donc pas sensible aux modifications de pondération apportées au calcul de l'indicateur de qualité dans les cas a), b) et c).

Concernant l'indicateur de qualité, le premier quadrant de la Figure 5.7 montre qu'il varie globalement entre 40% et 60% dans le cas de référence. Il n'y a pas de grosses variations de valeur de qualité entre les différentes paires car toutes les catégories sont pondérées de la même façon. Ainsi, les variations de scores qui pourraient exister entre les différentes catégories sont en quelque sorte lissées pour fournir un indicateur variant autour de 50%. Cela est différent pour les cas a), b) et c) où des coefficients de pondération spécifiques sont appliqués pour appuyer certains indicateurs ou catégories. En effet, les alternatives ne possèdent que peu de

correspondances et sont efficaces, fournissant alors un score de qualité plus élevé dans le cas a). Dans le cas b), comme les capacités horaires des alternatives sont assez faibles car comportant beaucoup de bus simples à fréquence moyenne, la qualité des paires l'est aussi. Enfin, dans le cas c), le relatif faible éloignement des origines des paires de Polytechnique permet de disposer de trajets assez rapides, augmentant ainsi la qualité de celles-ci.

Le Tableau 5.3 Comparaison des indicateurs de qualité dans les différents cas pour les 10 paires OD apporte plus de détails sur les différentes valeurs de l'indicateur de qualité pour les 10 paires et suivant les cas. En comparant le cas a) et le cas de référence, on peut noter une augmentation de qualité de 19% pour la paire avec 1 alternative et de 20% pour celle avec 4 alternatives. En effet, ces deux paires sont assez proches de Polytechnique et possèdent soit des trajets directs, soit des alternatives avec une correspondance de métro à métro. De plus, leur score de directitude est également très élevé. Dans le cas b), la paire possédant 7 alternatives et celle en possédant 10 voient leur score diminuer de façon moins prononcée que les autres. En effet, ces paires possèdent des alternatives offrant des séquences de lignes de métro très performantes. En revanche, la paire avec une seule alternative contient une seule ligne mais de fréquence moyenne, et son indicateur de qualité est donc celui qui connaît la plus forte baisse. Pour finir, les indicateurs de qualité dans le cas c) augmentent tous de 7 à 20% par rapport au cas de référence, illustrant ainsi leurs bons scores dans la catégorie temps.

Tableau 5.3 Comparaison des indicateurs de qualité dans les différents cas pour les 10 paires OD

Paires OD	QRéf	QA	QA - QRéf	QB	QB - QRéf	QC	QC - QRéf
N1	72%	91%	↑ 19%	34%	↓ -38%	91%	↑ 20%
N2	60%	73%	↑ 14%	32%	↓ -28%	75%	↑ 15%
N3	60%	66%	↑ 6%	31%	↓ -29%	74%	↑ 14%
N4	57%	77%	↑ 20%	30%	↓ -27%	76%	↑ 19%
N5	51%	65%	↑ 14%	34%	↓ -16%	66%	↑ 16%
N6	44%	46%	↑ 1%	27%	↓ -18%	57%	↑ 13%
N7	44%	38%	↓ -6%	35%	↓ -9%	51%	↑ 7%
N8	40%	44%	↑ 4%	19%	↓ -21%	59%	↑ 19%
N9	54%	65%	↑ 11%	27%	↓ -27%	71%	↑ 16%
N10	50%	59%	↑ 10%	39%	↓ -10%	60%	↑ 11%

5.2 Automatisation sur le territoire montréalais

La précédente étude de cas s'intéresse qu'à un nombre relativement restreint de paires OD. Cependant, il est pertinent de tester la méthode à grande échelle, en automatisant les calculs pour un plus grand nombre d'alternatives : c'est l'objet de cette section.

5.2.1 Présentation des données

Afin de couvrir l'ensemble du territoire de l'île de Montréal, les origines des paires OD ont été choisies dans les 41 secteurs municipaux de l'île (SM 101 à 141). Pour chacun de ces secteurs, 3 origines ont été sélectionnées aléatoirement, soit au total 123. Encore une fois, la destination de ces 123 paires OD est unique puisqu'il s'agit de Polytechnique (voir Figure 5.1). Enfin, le créneau horaire choisi pour répertorier les différentes alternatives de TC est 7h00-8h00, créneau d'une durée d'une heure et situé dans le pic du matin.

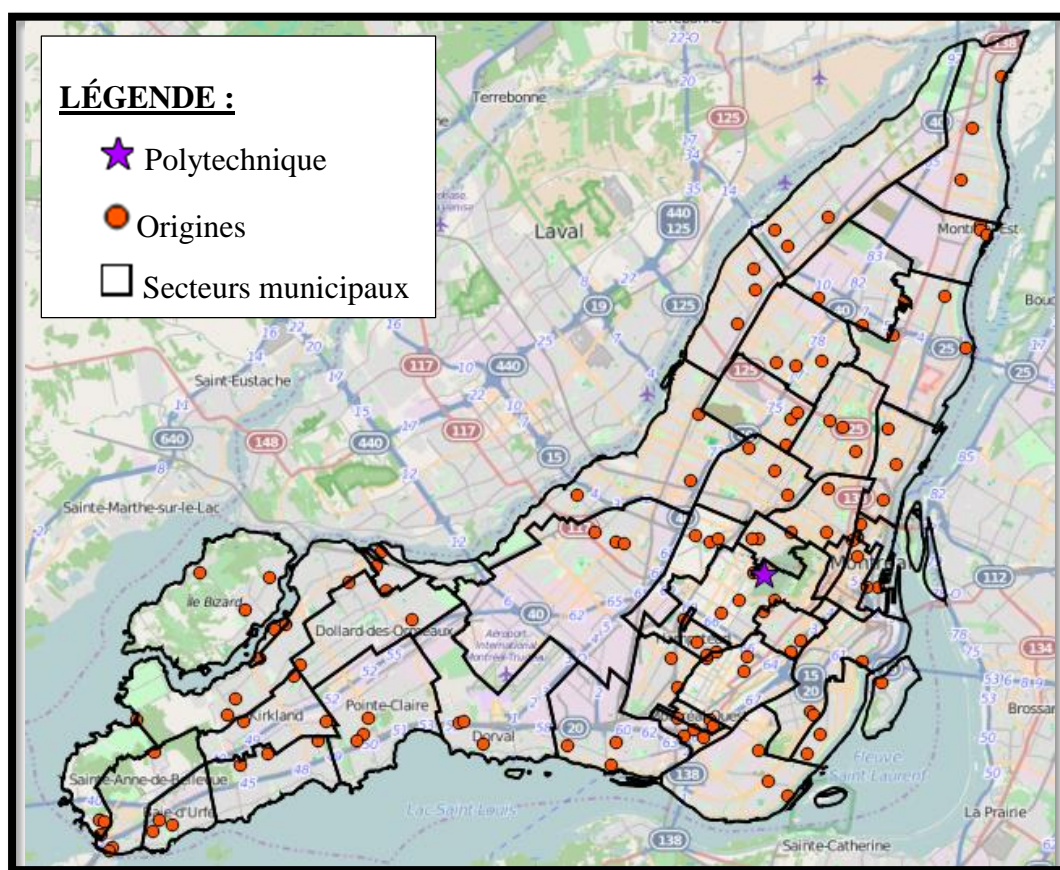


Figure 5.8 Localisation des origines et destination dans les secteurs municipaux de Montréal

5.2.2 Déroulement de la méthode automatisée

Afin de calculer les alternatives de TC disponibles pour ces 123 paires OD, un calculateur de trajets en transport en commun, développé par la Chaire Mobilité est utilisé. Ce dernier permet de trouver le trajet le plus rapide permettant de rejoindre une origine à une destination pour une certaine heure. Il utilise pour cela les données GTFS fournies par les sociétés de transport. Pour chacune des paires, le meilleur trajet a ainsi été calculé pour un jour de semaine toutes les minutes entre 7h00 et 8h00, soit $61 \times 123 = 7503$ calculs au total. Cependant, il est alors nécessaire de supprimer les doublons car certains trajets calculés se répètent. Les alternatives différentes, correspondant à une séquence de lignes et de correspondances différente comme précisé au 1.1.1, sont ainsi sélectionnées. Ce sont finalement 507 alternatives différentes qui sont ressorties du calculateur pour les 123 paires OD, avec une paire OD qui ne possédait aucune alternative de TC disponible.

Pour chacune des alternatives, les différents indicateurs introduits dans la section 4.2.2 Évaluation individuelle sont calculés. Le détail des calculs est le suivant :

- *Tacc* et *Tsor* sont des variables de sortie du calculateur. Ces temps sont calculés avec le chemin le plus court entre l'origine et le premier arrêt (respectivement entre le dernier arrêt et la destination) avec une vitesse de marche de 5 km/h. De plus, une pénalité supplémentaire de 20 secondes est imposée pour chaque traversée d'intersection avec feu de circulation; *Tvéh* est également une variable de sortie du calculateur, calculée grâce aux données GTFS;
- *Tatt* et *Tattc* sont calculés suivant les formules décrites en 4.2.2.1 Indicateurs de temps, grâce à l'intervalle moyen de service pour chaque ligne sur la période 7h00-8h00;
- *Tmarc* est également une variable de sortie du calculateur. Cependant, il est dérivé de la distance entre la station de descente et celle de montée entre les deux lignes impliquées dans la correspondance. Cela est donc satisfaisant pour les correspondances impliquant une ligne de bus, mais ne l'est plus pour les correspondances impliquant deux lignes sur rail (métro ou train). En effet, les stations de correspondance en métro ou train ont le même identifiant sur les deux lignes. La distance entre la station de descente et de montée est donc nulle et *Tmarc* est alors de 0. Pour remédier à cela, il est considéré que le temps de marche

en correspondance pour toutes celles incluant deux modes sur rail (métro ou train) est de 3 minutes;

- C est calculé comme le coût monétaire d'un titre de transport pour un passage unique et pour un utilisateur régulier. Si seules des lignes de la STM sont empruntées, alors C pour l'alternative est de 3.25\$. Si elle inclut une ligne de l'AMT, alors le tarif se calcule par zone et par réseau emprunté, suivant le Tableau 5.4 et la Figure 5.9;

Tableau 5.4 Tarifs d'un trajet suivant la zone et le réseau emprunté

	Réseau AMT	Réseau AMT + STM
<i>Zone 1</i>	4	4.5
<i>Zone 2</i>	4.5	5
<i>Zone 3</i>	5	5.5

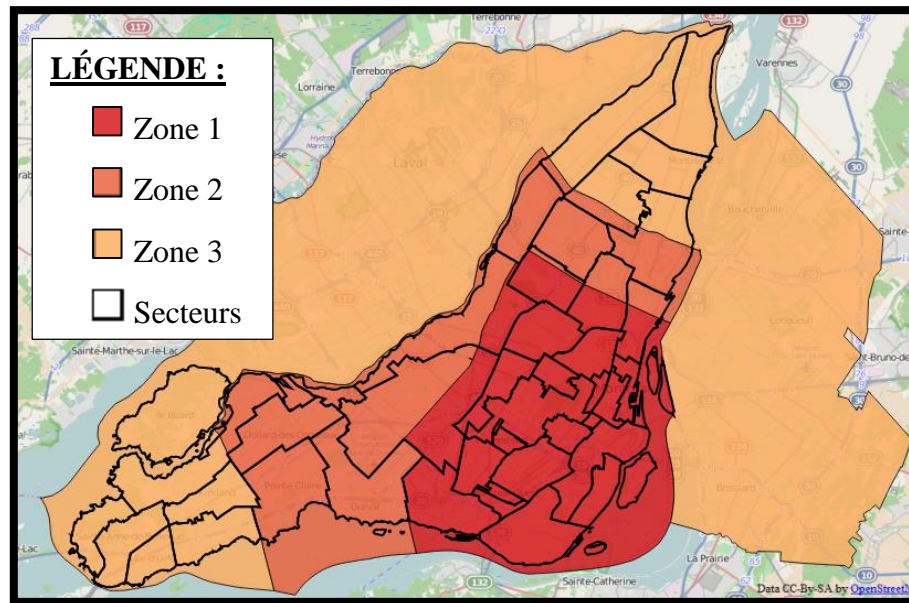


Figure 5.9 Zones tarifaires de l'île de Montréal

- N_c est une variable de sortie du calculateur;
- Les coûts de correspondance C_c sont calculés grâce à la formule présentée en 4.2.2.3 Indicateurs de correspondances, grâce à l'intervalle moyen de service pour chaque ligne sur le créneau 7h00-8h00;
- C_{ang} est calculé pour les alternatives comprenant au moins une correspondance, avec la formule introduite en 4.2.2.4 Indicateurs de directitude.
- H_{max} est calculé pour les alternatives directes sans correspondance. Pour chacune d'entre elles, c'est la distance maximale séparant les arrêts desservis et la ligne de désir.
- C_{aph} est calculé pour chaque ligne empruntée par une alternative, en tenant compte de la fréquence moyenne de service sur le créneau 7h00-8h00 et de la capacité théorique totale des véhicules. La capacité considérée des bus simples est ainsi de 75 personnes, 105 personnes pour les bus articulés, 1440 pour les métros (sauf la ligne bleu avec 960

personnes) et enfin 1500 pour toutes les lignes de train. Ces valeurs sont fixées à titre indicatif et sont susceptibles de varier dans la réalité. La capacité horaire totale de l'alternative est ensuite calculée en sommant les capacités horaires des lignes, pondérées par leur distance.

- *Stopkm* est obtenu en sommant le nombre d'arrêts desservis par toutes les lignes empruntées, divisé par la distance totale parcourue.
- *In* est obtenu selon une équation légèrement différente de celle présentée en 4.2.2.7 Indicateur d'indépendance. En effet, la formule employée prend en compte les arrêts desservis par les lignes de l'alternative. Pour chacun, l'inverse du nombre d'utilisations de cet arrêt par les autres alternatives de la paire OD est calculé. Ensuite, tous ces facteurs sont sommés pour obtenir l'indicateur d'indépendance de l'alternative.

L'étape de filtrage est ensuite nécessaire pour éliminer les alternatives sorties par le calculateur mais qui ne répondent pas aux contraintes fixées. Avec l'application des 6 contraintes détaillées en 4.2.3 Filtrage (minimum de 2 arrêts par bus, limite de 3 correspondances, limite de temps d'accès et de sortie, de temps de correspondance, de temps total et enfin de niveau d'indépendance), 119 alternatives sont supprimées sur les 507 disponibles.

Les scores de chacune des alternatives sélectionnées ont ensuite été calculés comme détaillé dans la section 4.2.4 Classement des alternatives. Les coefficients de pondération considérés sont ceux du cas de référence, précisés précédemment dans la section 5.1.2 Déroulement de la méthode. Cela a finalement permis de calculer pour chacune des 123 paires OD un indicateur de qualité et un indicateur de qualité.

5.2.3 Analyse des indicateurs et du filtrage

Comme énoncé précédemment, toutes les alternatives n'ont pas été conservées dans la méthode. Ainsi, c'est au total près de 23% des alternatives fournies par le calculateur qui ont été supprimées à l'étape de filtrage.

La Figure 5.10 présente la répartition cumulative des temps d'accès sur les alternatives de départ. Les temps d'accès ont une valeur allant jusqu'à près de 50 minutes. Cette valeur est très grande

pour un temps de marche, mais le calculateur n'impose dans son algorithme aucune limite à ce temps. Ainsi, 87,2% des alternatives ont un $T_{acc} \leq 23$ min, contrainte fixée dans l'étape de filtrage. Pour ce critère, 65 alternatives dépassent le seuil et sont donc supprimées des alternatives disponibles pour le calcul des indicateurs finaux.

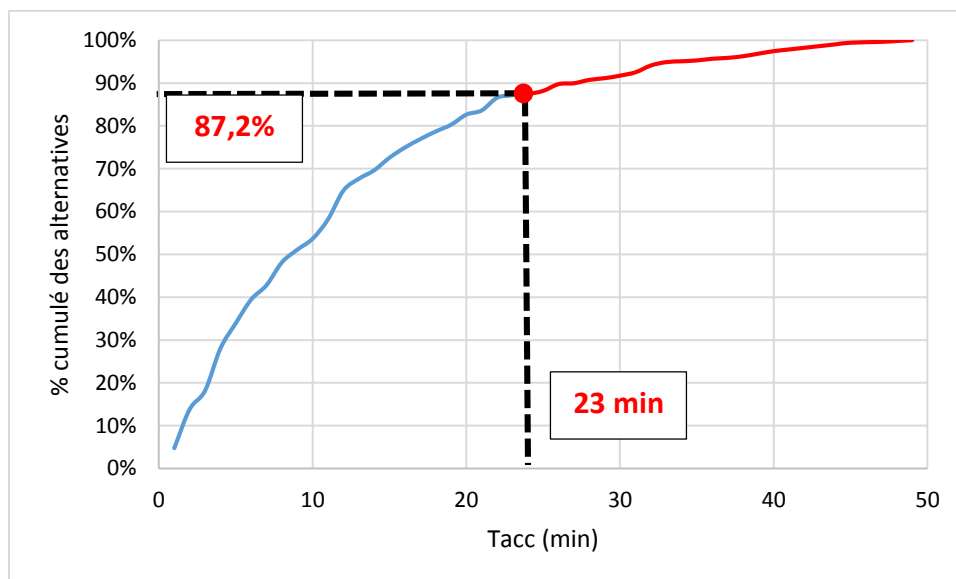


Figure 5.10 Pourcentage cumulé des temps d'accès des alternatives (N=507)

De même, la Figure 5.11 représente la répartition cumulée des temps de sortie des 507 alternatives. Comme la destination de toutes les alternatives est la même, les arrêts de TC permettant de rejoindre cette unique destination finale sont en nombre limité. C'est pourquoi T_{sor} ne peut prendre que certaines valeurs, comprises entre 7 et 21 minutes. Cela explique qu'il existe des sauts de valeur dans la répartition cumulée, correspondant aux différentes valeurs possibles de T_{sor} . De plus, comme celles-ci ne dépassent pas 23 minutes, aucune alternative n'est écartée par ce critère.

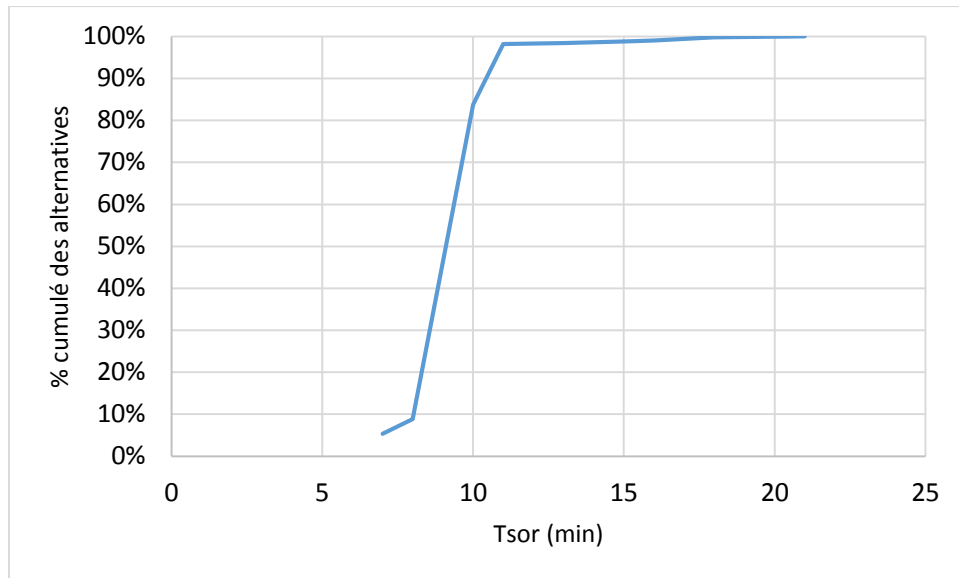


Figure 5.11 Pourcentage cumulé des temps de sortie des alternatives (N=507)

Concernant le temps de correspondance, composé du temps de marche et du temps d'attente en correspondance, la Figure 5.12 présente sa répartition cumulée pour les alternatives de départ. Pour rappel, ce temps est estimé car ce n'est pas une variable de sortie du calculateur. La courbe débute pour 0 min à 10% car cette même proportion d'alternative ne contient aucune correspondance. La répartition montre que 92,3% des alternatives ont un $T_{marcc} + T_{attc} \leq 30$ minutes, qui est la contrainte fixée par l'étape de filtrage. Ce sont donc 65 alternatives qui ne respectent pas ce critère.

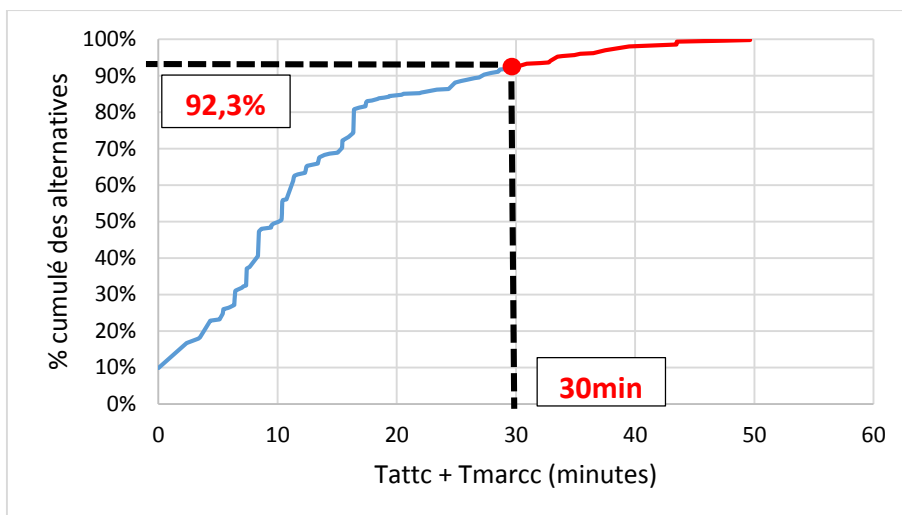


Figure 5.12 Pourcentage cumulé des temps de correspondance ($T_{attc} + T_{marcc}$) des alternatives ($N=507$)

Un autre critère de filtrage est de ne garder que les alternatives dont le temps total ne dépasse pas deux fois celui de l'alternative la plus rapide. Or, comme le calculateur fournit le meilleur trajet à chaque minute, cette condition est respectée pour toutes les alternatives fournies. La Figure 5.13 illustre les temps de trajet moyens des alternatives pour les 123 paires OD. Ils ont été calculés en effectuant une moyenne du temps total de trajet des alternatives disponibles pour la paire OD. Ces derniers sont très variables puisqu'ils oscillent entre 20 et 137 minutes. Logiquement, les temps de trajet deviennent de plus en plus grands lorsque l'on s'éloigne du centre de l'île, où se situe Polytechnique. Plus finement, on peut remarquer que les temps les plus courts se situent près de la ligne de métro bleue qui dessert Polytechnique et les plus longs sont tous situés à l'extrémité ouest de l'île.

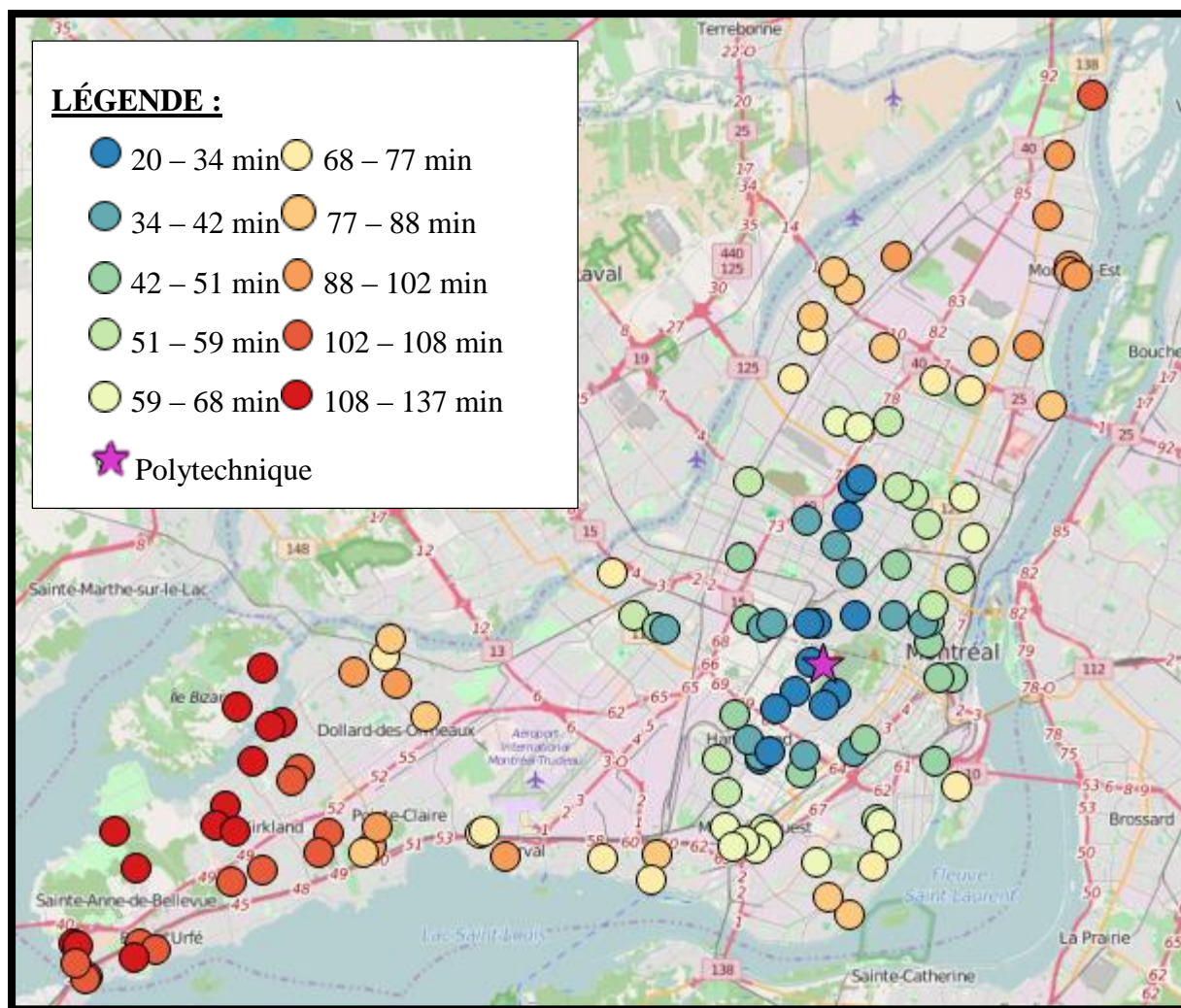


Figure 5.13 Temps de trajet moyen des alternatives pour les 123 paires OD

La répartition cumulée des temps de trajet totaux de chacune des 507 alternatives est présentée dans la Figure 5.14. Celle-ci est quasi-linéairement répartie, variant de 18 à 155 minutes. La médiane du temps total est de 72,9 minutes, et le 85^{ème} centile est à 102,3 minutes. Ces valeurs sont assez élevées mais s'expliquent par la distance entre plusieurs origines situées aux extrémités de l'île et Polytechnique, qui se situe plus au centre.

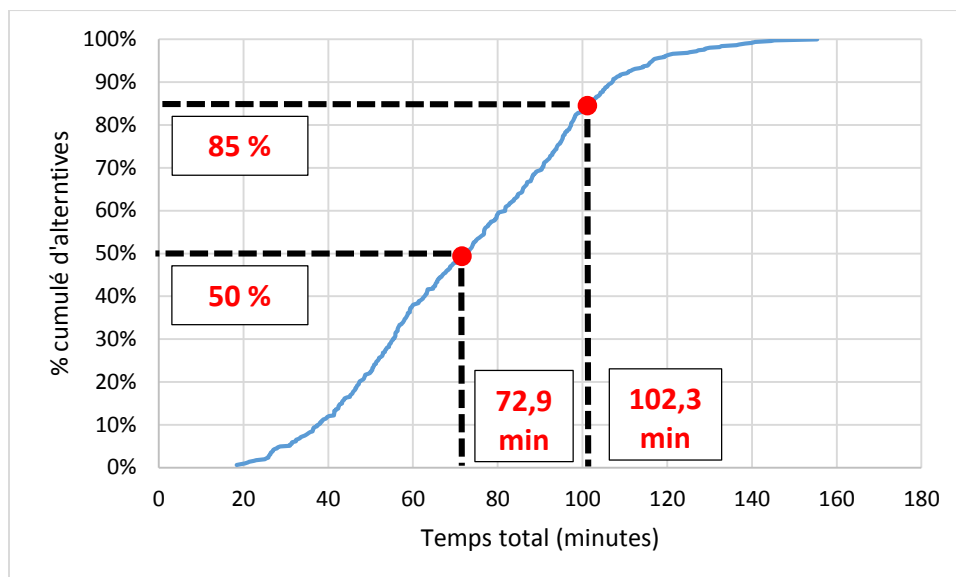


Figure 5.14 Pourcentage cumulé des temps totaux des alternatives (N=507)

La répartition du nombre de correspondances des alternatives se trouve dans la Figure 5.15. Le calculateur de trajet n'impose aucune limite quant à ce nombre. Ainsi, près de 10% des trajets sont directs et la grande majorité des alternatives avec correspondances en a 3 ou moins. Enfin, ce sont 2.6 % des alternatives qui possèdent 4 ou 5 correspondances. Les 13 trajets correspondants ne peuvent donc pas figurer dans les alternatives à considérer.

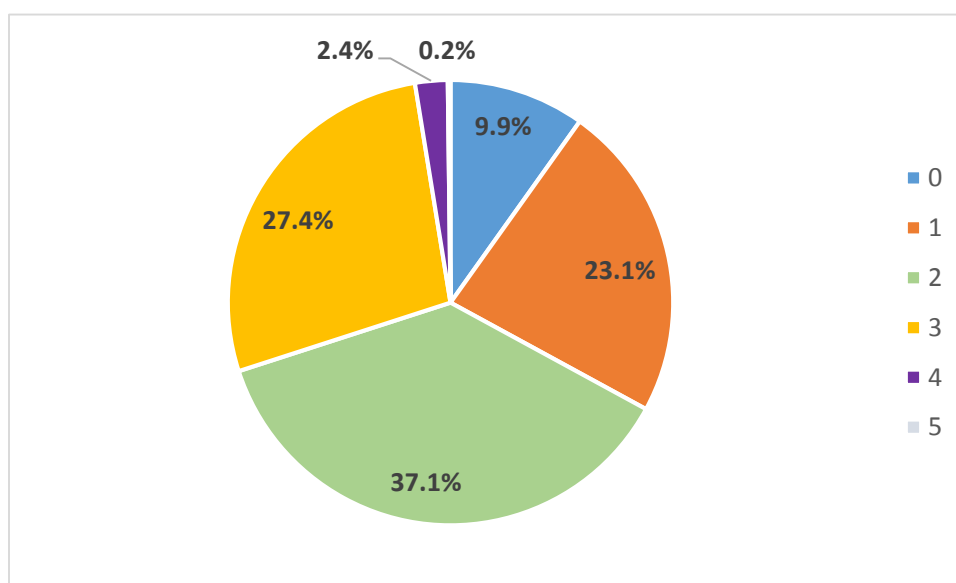


Figure 5.15 Répartition du nombre de correspondances des alternatives (N=507)

Pour finir, la répartition cumulée du niveau d'indépendance des alternatives est représentée sur la Figure 5.16. La courbe débute à un niveau d'indépendance de 0,24, qui est le niveau d'indépendance minimum des alternatives. Seulement 1,5% d'entre elles se situent sous le seuil imposé de 0,33. En effet, le niveau d'indépendance est globalement très élevé, puisque la moitié des alternatives se situe au-dessus de la barre des 0,9.

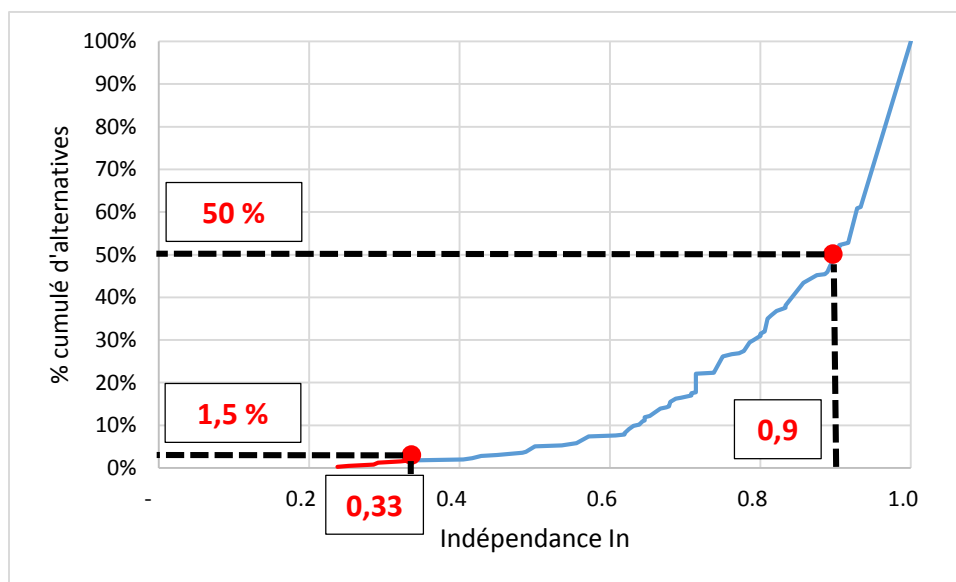


Figure 5.16 Pourcentage cumulé de l'indépendance des alternatives

Au terme de l'étape de l'étape de filtrage, 12 paires OD ne possédaient pas d'alternatives répondant aux critères imposés. Les origines de ces paires sont toutes situées à l'extrémité ouest de l'île. Cela traduit le fait qu'il n'existe pas de trajet de TC assez efficace pour rejoindre Polytechnique depuis ces origines. Un tel constat peut expliquer l'utilisation d'autres modes comme l'auto-solo pour les résidents de ces origines, non pas par choix au détriment du TC mais par obligation.

5.2.4 Répartition des indicateurs Q et D

Les indicateurs de qualité Q et de diversité D sont calculés pour chacune des 111 paires OD sélectionnées. La répartition de D est présentée dans la Figure 5.17. Ainsi, 21% des paires ont une diversité de 1, soit une seule alternative disponible. Plus de la moitié (52%) ont un indicateur compris entre 1 et 4. Enfin, un peu plus du quart possède un score de plus de 4 pour la diversité.

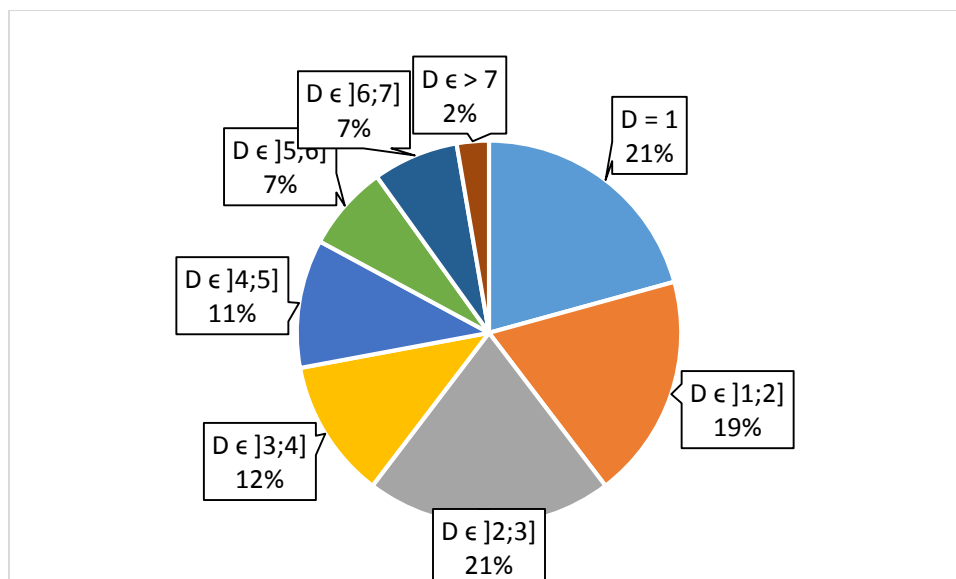


Figure 5.17 Répartition de l'indicateur de diversité D (N=111)

La répartition de l'indicateur Q est présentée dans la Figure 5.18. Près de la moitié des alternatives ont une qualité se situant entre 40% et 50%, 29% ont une qualité entre 50% et 60 %. Près du quart de celles-ci ont une qualité hors de ces intervalles, c'est-à-dire inférieure à 40 % ou supérieure à 60%.

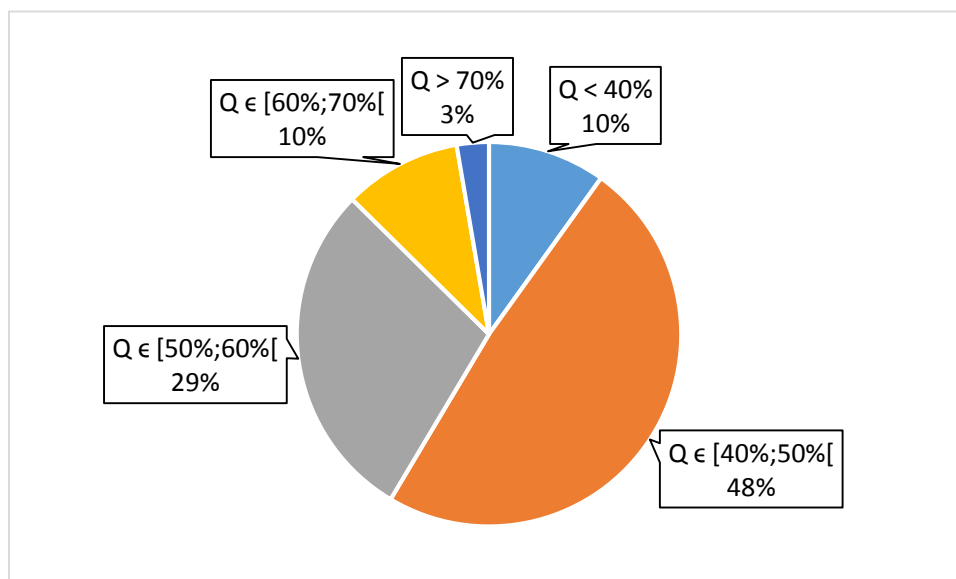


Figure 5.18 Répartition de l'indicateur de qualité Q (N=111)

Les indicateurs de qualité et de diversité des 111 paires restantes sont reportés dans un quadrant dans la Figure 5.19. Comme précisé précédemment, près des $\frac{3}{4}$ des alternatives se situent dans les 2 quadrants où la diversité est inférieure à 4. De plus, une ligne de point se dessine pour $D=1$, ce qui correspond à toutes les alternatives qui n'ont qu'une seule alternative et qui partage donc le même score de diversité. Pour le niveau de qualité, toutes les alternatives se situent globalement entre 30% et 70%, traduisant une répartition autour de 50%. Cela s'explique par le fait que le cas de référence choisi ne privilégie aucune catégorie particulière et renvoie donc des scores moyens. Enfin, la qualité des alternatives pour un indicateur de diversité supérieur à 4 semble décroître. Cet effet ne traduit pas une corrélation entre les deux indicateurs, qui n'est pas possible de par leur formulation. C'est ainsi la sous-représentation d'alternatives dans les cadrans de haute diversité qui entraîne cette impression.

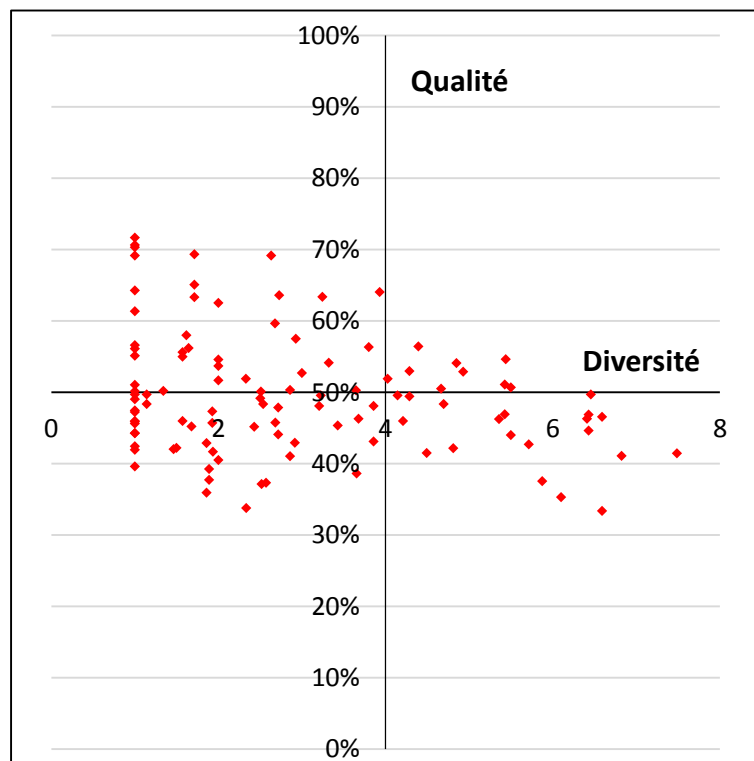


Figure 5.19 Quadrant de diversité et qualité pour les 111 paires OD sélectionnées

5.2.5 Analyse territoriale

Le choix de la répartition géographique des 123 paires OD entraîne une analyse territoriale de la répartition des deux indicateurs. La Figure 5.20 montre dans un premier temps cette répartition pour l'indicateur de qualité. Il est à noter que pour les paires dont les alternatives n'ont pas été sélectionnées, les indicateurs de qualité et diversité sont fixés à 0.

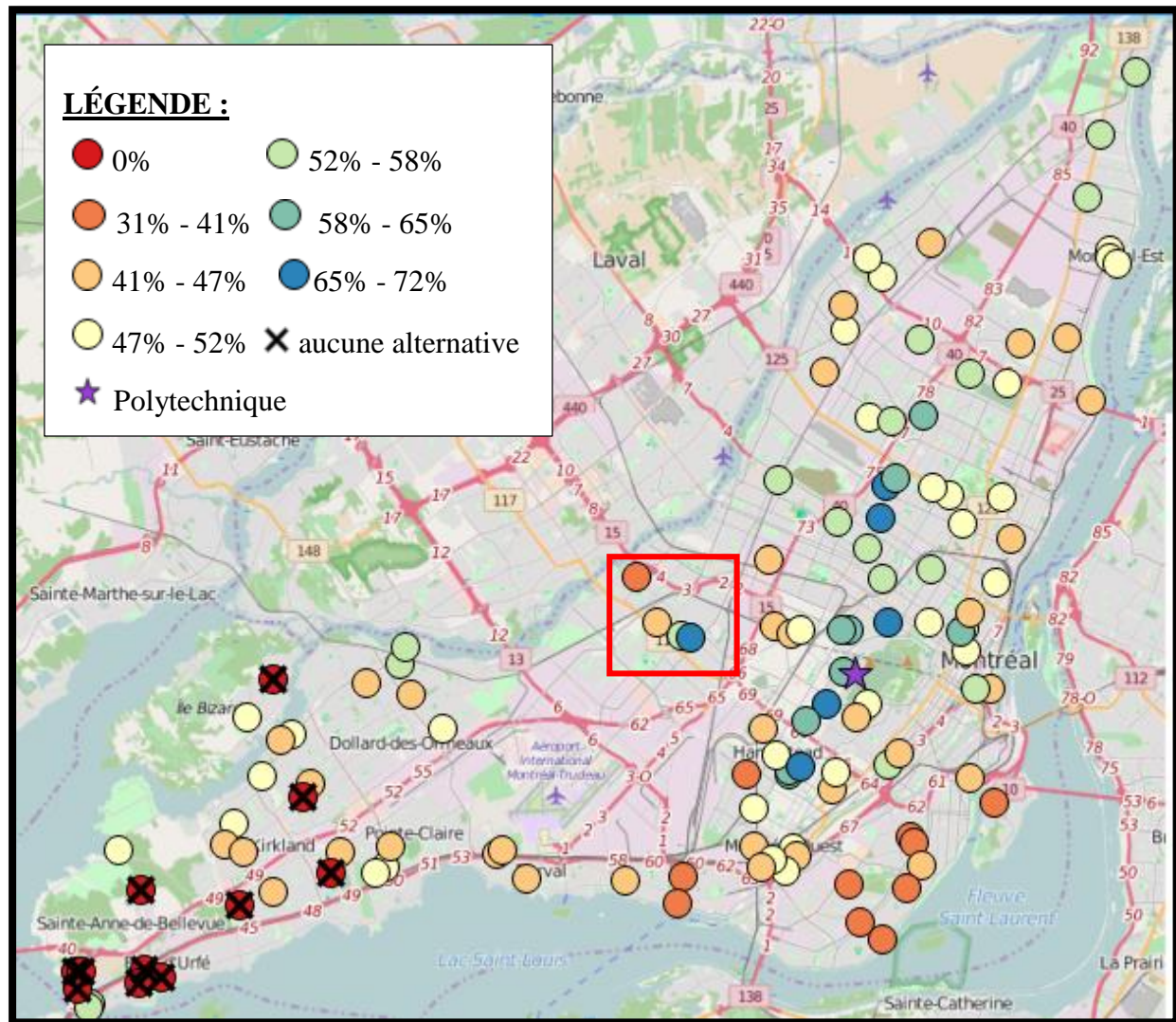


Figure 5.20 Répartition sur le territoire de l'île de l'indicateur de qualité des 123 paires

Ainsi, les origines de la pointe ouest de l'île ne possèdent aucune alternative efficace pour rejoindre Polytechnique. Cela peut s'expliquer par le manque de service de TC desservant cette

partie éloignée et peu dense de l'île. Certaines origines à l'ouest ont cependant un indicateur de qualité moyen, car elles sont situées près d'un service express irriguant certaines grandes artères de ces secteurs. À l'inverse les origines qui possèdent le meilleur score de qualité sont situées au centre de l'île près de Polytechnique. Cela est particulièrement vrai pour les origines proches de la ligne bleue de métro et certaines stations de la ligne orange.

La Figure 5.21 montre un cas particulier de l'île : celui proche du terminus du métro orange Côte Vertu. Logiquement, on peut y voir que plus l'origine s'éloigne de la station, plus la qualité des alternatives partant de cette origine décroît. Cela est cohérent car les alternatives plus loin du terminus ont un temps d'accès vers celui-ci plus long, voire empruntent une ligne de bus pour le rejoindre, engendrant un temps et un nombre de correspondances plus grand.



Figure 5.21 Gros plan sur le secteur Côte-Vertu

La Figure 5.23 montre la même démarche pour l'indicateur de diversité. D'une part, la répartition de l'indicateur de qualité est très différente de celle de l'indicateur de diversité. D'autre part, encore une fois, l'ouest de l'île pâtit d'un mauvais score de diversité, expliqué par un faible nombre d'alternatives permettant de rejoindre Polytechnique. Cela peut ensuite paraître étonnant de retrouver un faible score de diversité pour de nombreuses origines situées au centre de l'île, près de Polytechnique. Cela s'explique justement par cette faible distance entre l'origine et la

destination, car alors les variantes de trajet pour se rendre à Polytechnique sont trop complexes pour représenter de véritables alternatives.

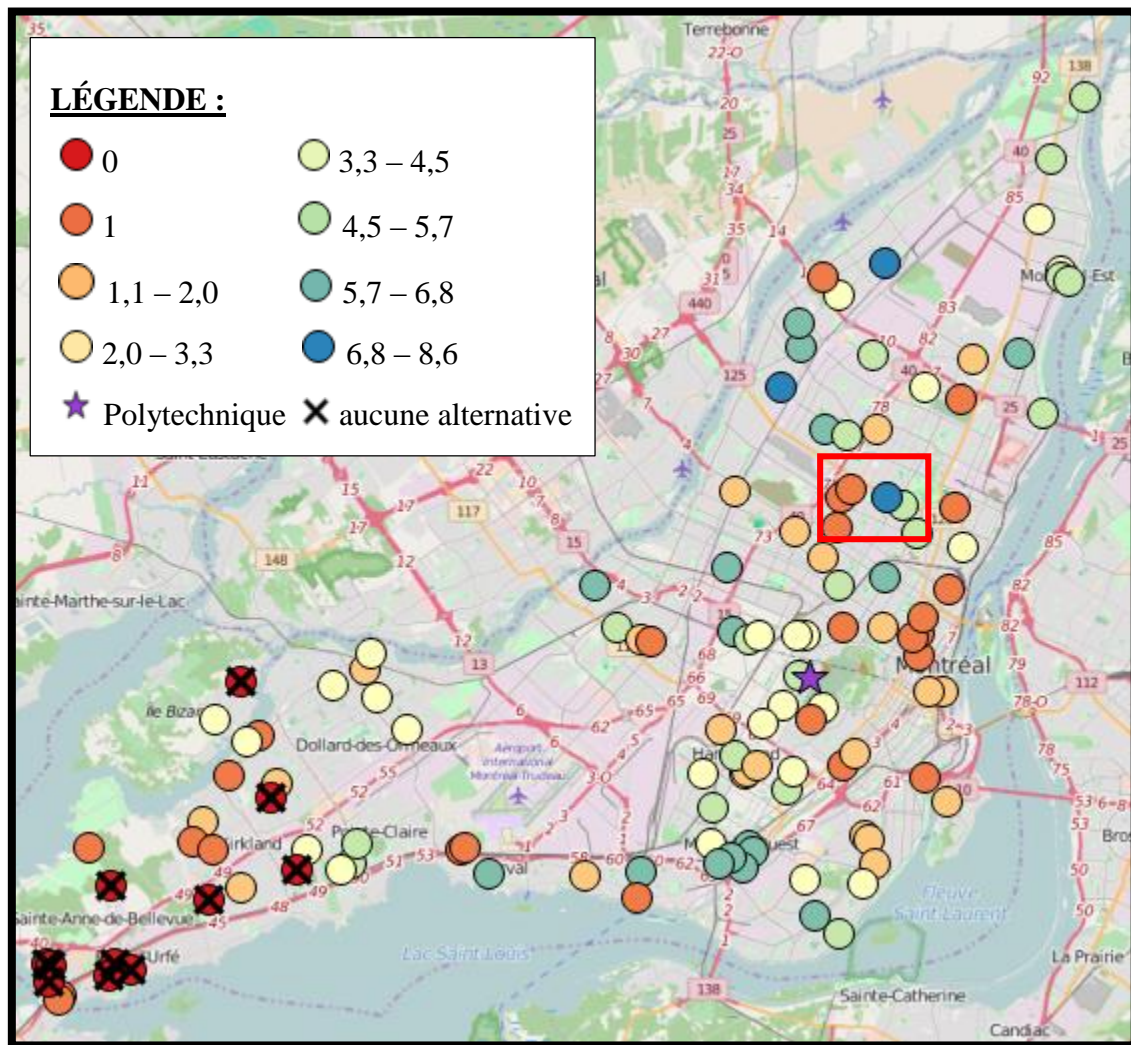


Figure 5.22 Répartition sur le territoire de l'île de l'indicateur de diversité des 123 paires

La Figure 5.23 présente un zoom de quelques origines situées dans le même secteur mais possédant des scores de diversité très différents. Ces variations s'expliquent par leur relative proximité d'une station de métro de la ligne bleue, qui permet de rejoindre directement Polytechnique. Celles à proximité ont toujours la même et unique meilleure alternative, empruntant la ligne bleue et possèdent donc un score de diversité de 1. Celles plus loin possèdent des alternatives avec la ligne bleue, mais aussi avec des lignes de bus permettant de rejoindre la ligne orange par exemple, augmentant ainsi leur score de diversité.



Figure 5.23 Gros plan sur le secteur St-Michel

Ensuite, les trois origines présentes dans chaque secteur municipal ont permis de fournir les deux indicateurs agrégés par zone. Pour cela, une moyenne sur les indicateurs des trois origines est réalisée. La Figure 5.24 présente la répartition, par secteur municipal de l'indicateur de qualité.

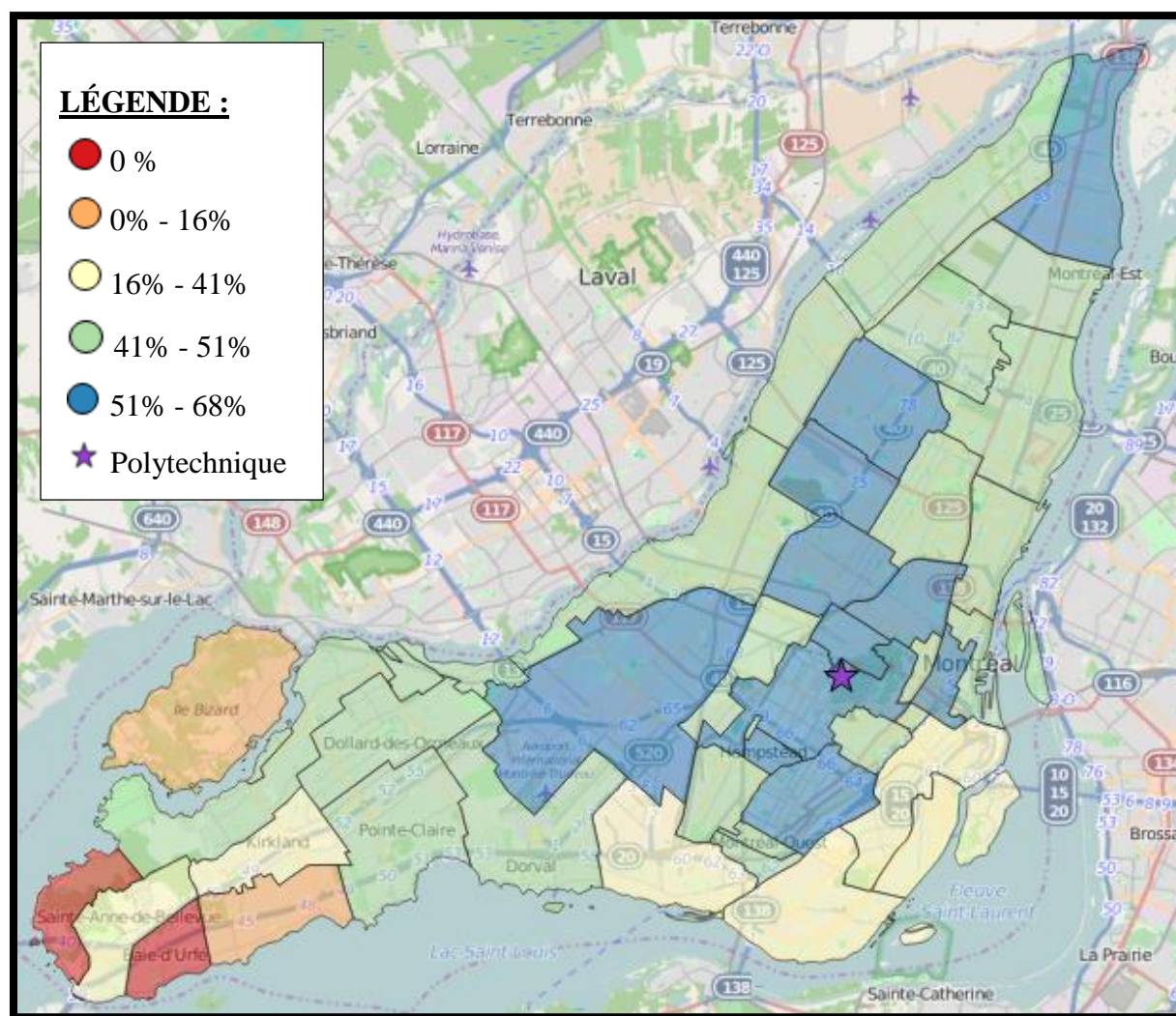


Figure 5.24 Répartition agrégée par secteur municipal de l'indicateur de qualité

Les deux secteurs municipaux à l'extrême ouest de l'île n'ont aucune alternatives efficace pour réaliser le trajet TC jusqu'à Polytechnique. De même, les scores des autres secteurs à proximité sont faibles. En revanche, les secteurs centraux de l'île situés près de Polytechnique ont une qualité très satisfaisant à plus de 51%.

La Figure 5.25 illustre cette fois-ci la répartition de l'indicateur de diversité par zone. L'ouest de l'île ne possède pas une grande diversité d'alternatives TC, tout comme les secteurs proches de l'école. Cela reflète les commentaires précédents sur le niveau de diversité des origines de l'ouest et du centre. Il faut ainsi s'éloigner de Polytechnique pour retrouver une plus grande diversité d'alternatives. C'est particulièrement le cas pour le secteur de Montréal Nord, qui bénéficie de

CHAPITRE 6 CONCLUSION

Le présent chapitre apporte une conclusion au mémoire du projet de recherche. Il synthétise dans un premier temps les différentes étapes de la recherche, avant de préciser ses contributions méthodologiques et analytiques. Il revient ensuite sur les limitations à considérer dans la méthodologie présentée et introduit les perspectives de recherche futures.

6.1 Synthèse de la recherche

Tout d'abord, la revue de littérature permet d'avoir un aperçu général de la modélisation classique en matière de choix modal et de choix de route. Elle résume les différents paramètres pouvant être considérés afin d'évaluer la qualité d'une alternative de TC : correspondance, fiabilité, achalandage ou encore distorsion géométrique. Elle expose la nécessité de développer une méthode pour prendre en compte ces différents aspects à l'échelle d'un trajet de TC.

Une analyse de différents sondages réalisés par les sociétés de transport de Montréal et sa région a permis de mieux cerner les attentes des utilisateurs face au TC. Les contextes des 3 sondages étudiés (SM, STM et RTL) sont variés puisque le premier concerne les améliorations apportées au service du train de banlieue, le second les attentes d'un panel d'utilisateurs du métro et/ou bus de la STM et enfin le dernier les perceptions des citoyens de Longueuil. Malgré ces différences, les résultats se rejoignent et montrent l'importance de la fiabilité et de la fréquence du service dans les principales attentes des passagers.

Ensuite, une méthodologie est introduite permettant de calculer un indicateur de diversité et un indicateur de qualité pour les alternatives TC disponibles pour une paire OD. À partir d'une origine, d'une destination et d'un créneau horaire, un calculateur de chemin génère des alternatives pour assurer le trajet. À partir de celles-ci, une série d'indicateurs permet leur évaluation puis le filtrage de certaines suivant différentes contraintes imposées. Des références et fonctions de comparaison sont définies pour chacun des indicateurs, permettant de fournir un score pour chacune des catégories (Temps, Coût, Correspondances, Directitude et Performance). Des coefficients de pondération permettent alors d'aboutir à un score pour chaque alternative, afin de pouvoir par la suite les classer. Ce classement permet enfin de fournir une diversité et une qualité pour la paire OD.

La méthode est ensuite testée sur deux cas d'étude. Le premier considère un échantillon de 10 paires OD toutes à destination de Polytechnique. Il permet de constater la sensibilité du classement des alternatives et des indicateurs aux coefficients de pondération appliqués dans la méthode. Le second contient 123 paires OD, dont les origines sont situées sur l'ensemble de l'île de Montréal et les destinations toutes à Polytechnique. Le grand nombre d'alternatives de TC disponibles a nécessité une automatisation de la méthode. Les résultats des indicateurs de diversité et de qualité par paire ou agrégés par secteur municipal permettent de constater les disparités de service de TC entre les différents secteurs de l'île. Ils permettent également de constater l'indépendance des deux indicateurs, les deux variant de manière différente suivant leur localisation.

6.2 Contributions

Le projet de recherche portant sur la diversité et la qualité des alternatives de TC apporte des contributions variées.

Tout d'abord, la revue de littérature sur la mesure de la qualité du transport en commun permet de rassembler les résultats de différentes études portant sur des aspects variés. Ces études apportent des contributions à la fois qualitatives mais aussi chiffrées sur la perception du temps des usagers du TC. En outre, l'analyse de données de sondages effectués par les sociétés de transport du Grand Montréal a permis de faire ressortir les attentes réelles des passagers. Elle a également permis de croiser les perceptions des usagers dans différents contextes pour se rendre compte de leurs similarités.

Ensuite, ces contributions sont de nature méthodologique, par le développement de méthodes d'évaluation. En effet, l'étape d'évaluation individuelle fournit une série d'indicateurs pour chaque alternative. Si certains sont classiques comme les temps de trajet et le coût, des améliorations sont apportées pour mieux prendre en compte certains aspects. Ainsi, l'estimation du temps d'attente s'effectue grâce à une fonction spécifique permettant de mieux correspondre à la réalité. Ensuite, un coût spécifique de correspondance est ajouté pour prendre en compte le type de transfert en plus du nombre de correspondances. La notion de directitude est aussi introduite pour considérer la distorsion géométrique d'un trajet. Pour finir, la performance est évaluée en considérant l'espacement des arrêts mais aussi la capacité horaire. La méthodologie

propose aussi une façon de classer les alternatives. Ce classement s'effectue par ordre de score des alternatives et peut varier suivant les coefficients de pondération imposés. Pour finir, deux indicateurs sont développés afin d'évaluer la qualité et la diversité des alternatives de TC. La méthode proposée se démarque alors de certaines approches présentées dans la revue de littérature. En effet, alors que ces méthodes fournissent un seul indicateur regroupant diversité et qualité à une échelle plus macroscopique, la méthode proposée fournit bien deux indicateurs distincts pour une paire OD. La méthodologie automatisée développée dans ce mémoire peut ainsi fournir un outil efficace pour les planificateurs afin de diagnostiquer leur réseau.

Finalement, les contributions du projet de recherche sont également analytiques. Le croisement de différents sondages a permis de cerner les grandes attentes et irritants en matière de TC. L'analyse de certaines questions a également permis de statuer sur l'importance relative de certains éléments, comme les correspondances, le temps d'attente ou encore le coût du trajet. La mise en pratique de la méthode à plus grande échelle a donné l'occasion de constater la répartition effective des différents indicateurs dans un cas concret, en lien avec les contraintes de filtrage. Cela a enfin permis de diagnostiquer la diversité et la qualité des alternatives TC pour rejoindre Polytechnique et ce par origine ou par secteur municipal.

6.3 Limitations

Il est important d'apporter quelques nuances au projet de recherche présenté. En effet, l'hypothèse de départ est que posséder une multitude d'alternatives TC avec une bonne qualité pour réaliser son trajet apporte une utilité plus grande à l'utilisateur. Bien que l'analyse de sondage nous ait permis de constater que d'autres variables que le temps étaient nécessaires pour évaluer un trajet TC, aucune preuve concrète ne permet de vérifier cette hypothèse. Ainsi, la validation de cette hypothèse nécessitera l'estimation de modèles de choix modal comprenant ces deux indicateurs, permettant de constater leur performance à reproduire les choix observés.

Ensuite, les deux calculateurs de trajet utilisés ne permettent pas de complètement déterminer toutes les alternatives disponibles. Google Maps est un outil assez efficace pour déterminer les différents trajets à disposition, mais il n'est pas possible de modifier son algorithme. Ainsi, certains de ses paramètres internes empêchent d'avoir la réelle étendue des alternatives disponibles. Ensuite, le calculateur développé par la chaire Mobilité est assez robuste et il est

possible de modifier directement les paramètres de son algorithme. Cependant, il ne fournit que le meilleur trajet disponible pour une heure précise et ne fournit donc pas toutes les alternatives à ce trajet le plus rapide. Il est donc nécessaire de développer ce dernier afin de le transformer en réel calculateur d'alternatives.

Pour finir, certaines valeurs de la méthode ont été fixées de façon arbitraire, en utilisant la connaissance actuelle du TC. Les différentes contraintes imposées dans l'étape de filtrage n'ont par exemple pas de fondements empiriques. De même, les références des indicateurs sont parfois fixées arbitrairement. Il en est de même pour le temps de marche en correspondance par exemple qui est estimé par une valeur unique pour toutes les correspondances entre deux métros. Pour pallier cela, des analyses de données de trajets de TC réellement pratiqués par les utilisateurs peuvent fournir un fondement plus pratique à ces différentes contraintes de filtrage et valeurs de référence.

6.4 Perspectives

Les perspectives du projet de recherche sont assez nombreuses, étant donné la méthodologie novatrice exposée. Tout d'abord, en continuité de l'analyse des sondages des sociétés de transport, il pourrait être pertinent de développer un sondage de type web par exemple, à diffusion large dans tout le Grand Montréal. Cela permettrait de sélectionner le type d'informations recueillies, qui pourraient permettre de valider nos hypothèses de départ et de paramétrer de manières plus efficaces les contraintes de filtrage et les références des indicateurs.

Une autre collecte de données pourrait également être effectuée afin de valider ou modifier certaines formulations d'indicateur. En effet, le temps d'attente est estimé grâce à une fonction dépendant de l'intervalle de service. Effectuer certains comptages aux quais du métro ou arrêts d'autobus permettrait de constater le comportement des gens face à leur temps d'attente, et de calibrer la fonction d'estimation grâce à ces données de terrain. Le temps de marche en correspondance doit également faire l'objet d'un recueil de données plus approfondi. La méthode développée utilise une approximation suivant le type de modes impliqués dans la correspondance. Cependant, ce dernier peut être très variable d'un transfert à l'autre. Ainsi, une correspondance entre un bus et un métro implique une différence de niveau plus ou moins grande et qui doit être mesuré sur le terrain. C'est aussi le cas pour les correspondances entre deux lignes

de métro, ou le type de configuration peut être très variable, allant du quai à quai jusqu'au cheminement de plusieurs centaines de mètres. En outre, le développement de nouveaux indicateurs plus qualitatifs pourrait être rendu possible utilisant à la fois des données de sondage et de technologies actuelles (GPS, carte à puce, etc.). Les aspects de confort à bord ou de fiabilité pourraient alors être inclus dans le jeu d'indicateurs d'évaluation.

L'hypothèse de départ suppose que les deux indicateurs fournis ont un impact sur le choix modal de l'utilisateur. Afin de le vérifier, il serait nécessaire de calculer ces indicateurs pour un grand nombre de paires OD et de croiser cela avec le mode déclaré de la personne ayant effectué le trajet entre O et D. Différentes formulations des indicateurs pourraient alors être testées pour vérifier laquelle permet de reproduire au mieux les comportements réels des voyageurs. Le test pourrait également être amené plus loin, en considérant les chaînes de déplacement des individus. Les indicateurs devraient alors être calculés pour chaque déplacement de la boucle et il faudrait alors tester quelle formulation est la plus adéquate (moyenne des indicateurs sur la boucle, minimum des indicateurs sur les déplacements de la boucle, etc.)

Par ailleurs, le cadre méthodologique du calcul des deux indicateurs de diversité et de qualité considère que le mode utilisé est uniquement le TC et que la personne ne possède aucune limitation spécifique. Ces hypothèses pourraient être élargies, en considérant d'autres types de déplacement monomodes, comme le vélo ou la voiture. La méthodologie devra alors s'adapter pour prendre en considération les spécificités de ces modes. Par exemple, les alternatives de trajet à vélo pourraient être évaluées en considérant une autre variété d'indicateurs adaptés, comme la présence de pistes cyclables. De plus, la méthode pourrait également s'appliquer aux déplacements de type bimodaux, qui incluent un autre mode que la marche pour rejoindre le premier arrêt par exemple ou lier le dernier arrêt à la destination finale. Enfin, des cas d'étude pour considérer certaines catégories de personnes, comme les personnes âgées ou les enfants pourraient permettre d'adapter la méthodologie à certains types d'utilisateurs. En effet, l'hypothèse simplificatrice émise selon laquelle les personnes ne possèdent aucune limitation ou caractéristique particulière affectant la diversité et la qualité de leurs alternatives ne reflète pas exactement la réalité. La méthode peut alors s'adapter en incorporant les caractéristiques sociodémographiques et limitations fonctionnelles des individus. Si par exemple le diagnostic du réseau doit être fait pour l'accessibilité aux personnes avec des limitations fonctionnelles, alors

des contraintes de filtrage supplémentaires doivent être imposées pour ne sélectionner que les alternatives réellement accessibles. En outre, de nouveaux indicateurs pourraient faire leur apparition pour s'adapter aux spécificités de ces personnes. À terme, il sera ainsi possible de généraliser la méthode pour déterminer la qualité et la diversité des alternatives de déplacement tous modes confondus selon les propriétés du voyageur.

Pour finir, la méthode est aisément transférable à différentes sociétés de transport. Ainsi, ces dernières peuvent réaliser un diagnostic de leur réseau de TC grâce au calcul de ces indicateurs. Par exemple, lorsqu'il est question d'implanter un nouveau système de transport sur un certain axe, la comparaison entre les indicateurs calculés avant et après pour plusieurs paires OD peut justifier ou non sa réalisation. De plus, bien que les exemples présentés concernent en particulier l'île de Montréal, la méthode est aisément applicable à d'autres cadres, en adaptant éventuellement les différentes étapes méthodologiques au contexte particulier.

Finalement, ce sujet est et sera de plus en plus dans l'ère du temps, car il se situe dans le nouveau paradigme de la mobilité, concept développé par George Amar (2015). Comme il l'explique, nous entrons dans une ère où l'on passe de la valeur de transit, où l'objectif est de rejoindre sa destination le plus vite possible, à la valeur « *reliance* », où le temps de trajet n'est plus un temps perdu mais un temps utile, une ère où le but n'est pas de relier deux points en minimisant le temps de trajet mais bien en maximisant l'utilité.

BIBLIOGRAPHIE

- Abrantes, P., & Wardman, M. (2011). Meta-analysis of UK Values of Travel Time: An Update. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 45 (1), 1-17.
- Agence Métropolitaine de Transport (2015). *Répartition des commentaires émis par les usagers du train de banlieue en 2012 et 2013* [graphique]. Tiré de <https://www.amt.qc.ca/fr/a-propos/consultations-clienteles/enquete-a-bord#tabs1-toutes>
- Amar, G. (2010). *Homo Mobilis, le nouvel âge de la mobilité*. France : éditions Fyp
- Anderson, M. K. (2013). *Behavioural Models for Route Choice of Passengers in Multimodal Public Transport Networks*. (Thèse de doctorat, Technical University of Denmark, Kgs Lyngby, Danemark).
- Appert, M., & Laurent, C. (2008). *Measuring urban road network vulnerability using graph theory : the case of Montpellier's road network*. La mise en carte des risques naturels. Tiré de <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00841520/>
- Arentze, T. A., & Molin, E. J. (2013). Travelers' preferences in multimodal networks: Design and results of a comprehensive series of choice experiments. *Transportation Research Part A* 58, 15–28.
- Barbey, J., & Kaufmann, V. (2007). *Mesurer la qualité des transports publics : Développement d'un système d'indicateurs de qualité*. Lausanne, Suisse : EPFL.
- Bates, J. (2008). History of Demand Modelling. Dans D. A. Hensher, & K. J. Button (édit.), *Handbook of Transport Modelling - Second Edition* (pp. 11-34). Elsevier.
- Ben-Akiva, M., & Bierlaire, M. (1999). Discrete choice methods and their applications to short term travel decisions. Dans Hall, R.W (édit), *Handbook of Transportation Science* (pp. 5-34). Kluwer, Dordrecht, The Netherlands: Springer.
- Bovy, P.H., & Hoogendoorn-Lanser, S. (2005). Modelling Route Choice Behaviour in Multimodal Transport Networks. *Transportation*, 32(4), 341-368.

- Bovy, P. H. (2009). On Modelling Route Choice Sets in Transportation. *Transport Reviews: A Transnational Transdisciplinary Journal*, 29(1), 43-68.
- Cambridge Systematics Inc. et al. (2012). *Travel Demand Forecasting: Parameters and Techniques* (NCHRP Report 716). Washington, D.C.: Transportation Research Board, National Research Council.
- Carrel, A., Halvorsen, A., & Walker, J. (2013). Passengers' perception of and behavioral adaptation to unreliability in public transportation. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* (2351), 153-162.
- Cascetta, E., Nuzzolo, A., Russo, F., & Vitetta, A. (1996). A modified logit route choice model overcoming path overlapping problems: specification and some calibration results for interurban networks. Dans Lesort, J.B. (édit), *Proceedings of the 13th International Symposium on Transportation and Traffic Theory* (pp. 697-711). Lyon, France: Pergamon.
- Ceder, A. (2007). *Public transit planning and operation: theory, modeling and practice*. Elsevier, Butterworth-Heinemann.
- Dowling, R., Reinke, D., Flannery, A., Ryus, P., Vandehey, M., Petritsch, T., Landis, B., Rouphail, N., Bonneson, J. (2008). *Multimodal Level of Service Analysis for Urban Streets* (NCHRP Report 616). Wasington D.C.: Transportation Research Board, National Research Council.
- Du, Q., Aiura, N., Nakatsuji, T., & Kishi, K. (2014). Vulnerability Scanning Methodology Applied to Multiple Logistics Transport Networks. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* No. 2410, 96–104.
- Dziekan, K., & Vermeulen, A. (2006). Psychological effects of and design preferences for real-time information displays. *Journal of Public Transportation* 9 (1), 71–89.
- Eboli, L., & Mazzulla, G. (2011). A methodology for evaluating transit service quality based on subjective and objective measures from the passenger's point of view. *Transport Policy* 18, 172–181.

- Eluru, N., Khakour, V., & El-Geneidy, A. (2012). Travel mode choice and transit route choice behaviour in Montreal: insights from McGill University members commute patterns. *Public Transport*, 4(2), 129–149.
- Gleyze, J.-F. (2001). *Réseaux, territoires, et accessibilité*. Institut Géographique National, Laboratoire COGIT.
- Gooze, A., Watkins, K. E., & Borning, A. (2013). Benefits of Real-Time Transit Information and the Impacts of Data Accuracy on the Rider Experience. Proceedings of *Transportation Research Board 92nd Annual Meeting*. Washington D.C. Transportation Research Board, National Research Council.
- Hadas, Y., & Ranjitkar, P. (2012). Modeling public-transit connectivity with spatial quality-of-transfer measurements. *Journal of Transport Geography* 22, 137–147.
- Haywood, L., & Koning, M. (2012). *Estimating Crowding Costs in Public Transport*. Berlin: Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung.
- Hunt, J. D. (1990). A logit model of public transport choice route. *ITE Journal*, 60(12), 26-30.
- Iseki, H., Taylor, B. D., & Miller, a. M. (2006). *The Effects of Out-of-Vehicle Time on Travel Behavior: Implications for Transit Transfers*. California Department of Transportation
- Kaplan, S., Popoks, D., Prato, C. G., & Ceder, A. A. (2014). Using connectivity for measuring equity in transit provision. *Journal of Transport Geography*, 37, 82-92
- Kaufmann, V., Messer, M. A. (2012). *Analyse critique et propositions d'amélioration du réseau de tram genevois*. Lausanne, Suisse : Communauté d'études pour l'aménagement du territoire, EPFL.
- Kittelsohn & Associates Inc., Parsons Brinckerhoff, KFH Group Inc., Texas A&M Transportation Institute, Arup (2013). *Transit Capacity and Quality of Service Manual 3rd edition (TCRP Report 165)*. Washington, D.C.: Transportation Research Board, National Research Council.

- Koppelman, F. S., & Bhat, C. (2006). *A Self Instructing Course in Mode Choice Modeling: Multinomial and Nested Logit Models*. U.S. Department of Transportation, Federal Transit Administration.
- Kroes, E., Kouwenhoven, M., Debrincat, L., & Pauget, N. (2014). The Value Of Crowding On Public Transport In Île-De-France. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2417), 37-45.
- Litman, T. (2008). Valuing Transit Service Quality Improvements. *Journal of Public Transportation*, 11(2), 43-63.
- Litman, T. (2013). *Evaluating Public Transit Benefits and Costs - Best Practices Guidebook*. Victoria, BC : Victoria Transport Policy Institute.
- Luethi, M., Weidmann, U., & Nash, A. (2007). Passenger arrival rates at public transport stations. *Proceedings of the 86th Annual Meeting of the Transportation Research Board*. Washington D.C.: Transportation Research Board, National Research Council.
- Lyons, G., & Urry, J. (2005). Travel time use in the information age. *Transportation Research Part A* 39 , 257–276.
- Lyons, G., Jain, J., Holley, D. (2007). The use of travel time by rail passengers in Great Britain. *Transportation Research Part A* 41, 107-120.
- Mamun, S. A., & Lownes, N. E. (2012). Integrating Public Transit Accessibility and Connectivity. *Proceedings of the 91st Annual Meeting of the Transportation Research Board*. Wahington, D.C.: Transportation Research Board, National Research Council.
- Nassir, N., Ziebarth, J., Sall, E., & Zorn, L. (2014). A Choice Set Generation Algorithm Suitable for Measuring Route Choice Accessibility. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2430), 170-181.
- Nazem, M., Trépanier, M., & Morency, C. (2011). Demographic analysis of public transit route choice. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2217, 71-78.

- Nazem, M. (2014). *Contributions à la modélisation des déplacements en transport collectif. (Thèse de doctorat, École Polytechnique de Montréal, Montréal, QC).*
- Nielsen, O. (2000). A stochastic transit assignment model considering differences in passengers utility functions. *Transportation Research Part B* 34, 377-402.
- Nielsen, O., & Frederiksen, R. (2006). Optimisation of Timetable-based, Stochastic Transit Assignment Models based on MSA. *Annals of Operations Research* 144(1), 263-285.
- Nielsen, O., & Johansen, M. (2012). Køreplansbaseret Rutevalgmodel og Matricer for Kollektiv Trafik i Landstrafikmodellen v1.0. *Proceedings for the Annual Transport Conference.* Aalborg, Aalborg University, Danemark (en Danois).
- Ortúzar, J. d., & Willumsen, L. G. (2011). *Modelling Transport, Fourth Edition.* John Wiley & Sons.
- Prato, C. G. (2009). Route choice modeling: past, present and future research directions. *Journal of Choice Modelling*, 2(1), pp. 65-100.
- Raveau, S., Guo, Z., Muñoz, J. C., & Wilson, N. H. (2014). A behavioural comparison of route choice on metro networks: Time, transfers, crowding, topology and socio-demographics. *Transportation Research Part A* 66, 185-195.
- Raveau, S., Muñoz, J. C., & Grange, L. d. (2011). A topological route choice model for metro. *Transportation Research Part A* 45, 138–147.
- Roquigny, Q. (2013). *Valeurs du temps.* Paris : Commissariat général à la stratégie et à la prospective, Département Développement Durable.
- Rupi, F., Angelini, S., Bernardi, S., Danesi, A., & Rossi, G. (2015). Ranking links in a road transport network: a practical method for the calculation of link importance. *Transportation Research Procedia*, 5, 221 – 232.
- Sioui, L. (2014). *Pour une approche pragmatique et opérationnelle de la mobilité durable : concept, méthodes et outils.* (Thèse de doctorat, École Polytechnique de Montréal, Montréal, QC).

- Sicotte, G. (2014). *Modélisation de l'interdépendance entre modes de transport et chaînes de déplacements*. (Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal, Montréal, QC).
- Shaaban, K., Haasan H. M. (2014). Exploring the Factors Affecting Commuters' perspectives and tendency to use a Proposed Public Transit Service. *Proceedings of the 93rd Annual Meeting of the Transportation Research Board*. Washington D.C. : Transportation Research Board, National Research Council.
- Stratton, M., Wies, K., Vovsha, P., Freedman, J., Outwater M. (2013). *Transit Beyond Travel Time and Cost, Incorporation of Premium Transit Service Attributes in the Chicago Activity-Based Model*. Communication présentée à 14th TRB National Transportation Planning Applications Conference, Columbus, OH.
- Tirachini, A., Hensher, D. A., & Rose, J. M. (2013). Crowding in public transport systems: Effects on users, operation and implications for the estimation of demand. *Transportation Research Part A* 53 , 36-52.
- Turnbull, K. F., & Pratt., R. H. (2003). *Transit information and promotion: Traveler response to transport system changes (TCRP Report 95)*. Washington D.C.: Transportation Research Board.
- van der Waard, J. (1988). The Relative Importance of Public Transport Trip Time Attributes in Route Choice. Dans *Proceedings of the 16th PTRC Summer Annual Meeting*. Bath, United Kingdom.
- van Oort, N., Drost, M., Brands, T., & Yap, M. (2015). Data-driven public transport ridership prediction approach including comfort aspects. *Proceedings of the Conference on Advanced Systems in Public Transport* . Rotterdam, The Netherlands
- Vrtic, M., & Axhausen, K. (2002). Impact of Tilting Trains in Switzerland: Route Choice Model of Regional and Long-Distance Public Transport Trips. *Proceedings of the 82nd Annual Meeting of the Transportation Research Board*. Washington, D.C.: Transportation Research Board, National Research Council.
- Vuchic, V.R. (2005). Urban transit: operations, planning and economics. John Wiley & Sons, Hoboken, N.J.

- Watkins, K. E., Ferris, B., Borning, A., Rutherford, G. S., & Layton, D. (2011). Where Is My Bus? Impact of mobile real-time information on the perceived and actual wait time of transit riders. *Transportation Research Part A* 45, 839-848.
- Whelan, G., & Crockett, J. (2009). An investigation of the willingness to pay to reduce rail overcrowding. *Proceeding of the First International Conference on Choice Modelling*. Harrogate, England.
- Wood, D., Halvorsen, A., Koutsopoulos, H. N., & Wilson, N. (2015). New Methods for Measuring Passengers' Reliability Experience Using Automated Data Sources. *Proceedings of the Conference on Advanced Systems in Public Transport* . Rotterdam, The Netherlands

ANNEXES

ANNEXE A – SENSIBILITÉ DU CLASSEMENT AUX COEFFICIENTS DE PONDÉRATION POUR LES 10 PAIRES OD

N10

Réf.	A	B	C
1	3	1	2
2	1	3	5
3	2	6	4
4	8	2	1
5	5	5	3
6	4	8	7
7	6	7	6
8	7	10	10
9	10	4	8
10	9	9	9

N9

Réf.	A	B	C
1	1	3	2
2	5	1	1
3	6	2	4
4	2	7	3
5	7	5	5
6	3	8	6
7	4	9	7
8	8	6	8
9	9	4	9

N8

Réf.	A	B	C
1	1	4	1
2	2	8	4
3	3	2	2
4	4	3	5
5	5	6	6
6	6	7	7
7	8	1	3
8	7	5	8

N7

Réf.	A	B	C
1	1	3	5
2	3	4	2
3	5	2	1
4	6	1	3
5	4	5	4
6	2	7	7
7	7	6	6

N6

Réf.	A	B	C
1	1	1	1
2	3	2	2
3	2	6	6
4	4	3	3
5	5	4	4
6	6	5	5

N5

Réf.	A	B	C
1	1	3	1
2	2	2	2
3	3	4	4
4	4	1	3
5	5	5	5

N4

Réf.	A	B	C
1	1	2	1
2	2	3	3
3	3	1	2
4	4	4	4

N3

Réf.	A	B	C
1	1	1	1
2	2	2	3
3	3	3	2

N2

Réf.	A	B	C
1	1	2	1
2	2	1	2